

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Faculté des Mathématiques et de  
l'Informatique

Département l'informatique

N° :.....



DOMAINE : Mathématiques et  
Informatique

FILIERE : Informatique

OPTION : IDO

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme De Master Académique

Par : Benyahia Meryem El Batoul

Intitulé

**Une Approche D'optimisation Et De Simulation  
Multi-Objectifs Pour Une Chaîne  
D'approvisionnement**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. Salah Guesmia	Université de M'sila	Président
Dr. Bounif Mohamed	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. Nassereddine Amroune	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2023/2024**



# DÉDICACE

JE DÉDIE CE MÉMOIRE À :

MES CHERS PARENTS POUR TOUS LEURS SACRIFICES, LEUR AMOUR, LEUR TENDRESSE,

LEUR

PATIENCE, LEUR SOUTIEN ET LEURS PRIÈRES TOUT AU LONG DE MA CARRIÈRE, J'ESPÈRE

QU'ILS

TROUVERONT DANS CE TRAVAIL TOUTE MA RECONNAISSANCE.

A MES CHÈRE FRÈRES.

A TOUS MES AMIS ET À TOUS CEUX QUI ME CONNAISSENT.

# **REMERCIEMENT**

JE TIENS À REMERCIER MONSIEUR DR. BOUNIF MOHAMED ELHADI POUR SON ENTIÈRE

DISPOSITION, SES JUDICIEUSES CONSEILS.

CE TRAVAIL N'aurait pas pu aboutir à des résultats sans l'aide et les

encouragements de plusieurs personnes que nous remercions.

Merci à tous les membres du jury pour avoir évalué mon travail.

JE TIENS À REMERCIER TOUS LES ENSEIGNANTS DU DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	7
<b>CHAPITRE 1 : LES CHAINES LOGISTIQUES</b> .....	9
1.1 Introduction .....	10
1.2 Les chaînes logistiques .....	10
1.2.1 Définitions .....	12
1.2.2 Structure d'une chaîne logistique .....	13
1.2.3 Fonctions de la chaîne logistique .....	14
1.2.4 La gestion de la chaîne logistique ou supply chain management .....	17
1.2.5 Optimisation de la chaîne logistique .....	18
1.2.6 Modélisation des chaînes logistiques .....	20
1.3 Conclusion .....	22
<b>CHAPITRE 2 : ORDONNANCEMENT DE PRODUCTION</b> .....	23
2.1 Introduction .....	24
<b>2.2 La Gestion de production</b> .....	24
2.3 L'ordonnancement de la production .....	27
2.3.1 Les différents éléments d'un problème d'ordonnancement .....	28
2.3.2 Objectifs de l'ordonnancement .....	32
2.3.3 Diagramme de GANTT .....	33
2.3.4 Classes d'ordonnancement .....	34
2.3.5 Typologie des problèmes d'ordonnancements .....	35
2.3.6 Formalisation des problèmes d'ordonnancements .....	38
2.4 La théorie de la complexité .....	42
2.4.1 Complexité algorithmique .....	42
2.4.2 Complexité problématique .....	43
2.4.3 Hiérarchie de complexité pour les problèmes d'ordonnancement .....	45
2.5 Conclusion .....	48
<b>CHAPITRE 3 : FLOW-SHOP ET FLOW-SHOP HYBRIDE</b> .....	49
3.1 Introduction .....	50
3.2 Flow-Shop Classique .....	50
<b>3.4 Etat de l'art</b> : .....	51
3.4.1 Complexité .....	51
3.4.2 Méthodes exactes .....	52
3.4.3 Méthodes approchées .....	52
<b>3.5 Flow-Shop hybride</b> .....	53

## Table des matières

---

<b>3.6 Etat de l'art :</b> .....	54
3.6.1 Complexité.....	55
3.6.2 Méthodes exactes.....	55
3.6.3 Méthodes approchées.....	55
<b>3.7 Conclusion</b> .....	57
<b>CHAPITRE 4 : LA MÉTHODE DE RESOLUTION</b> .....	58
4.1 Introduction .....	59
4.2 couplage simulation et optimisation pour la conception des chaînes logistiques .....	59
4.3 Méthode d'optimisation.....	60
4.4 L'objectif de la méthode .....	60
4.5 L'architecture de la méthode .....	61
4.6 Outils et environnement de développement .....	62
4.7 Les résultats expérimentaux.....	65
Exemple sur l'implémentation .....	66
4.8 Conclusion .....	69
<b>Conclusion générale</b> .....	71
<b>Résumé</b> .....	73
<b>Bibliographie</b> .....	75

## Liste Des Figures

FIGURE 1.1: STRUCTURE D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE CONJOINTE [8] .....	14
FIGURE 2.1: DÉCOMPOSITION D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION [16] .....	25
FIGURE 2.2: CARACTÉRISTIQUE D'UNE TÂCHE .....	30
FIGURE 2.3 : EXEMPLE D'UN DIAGRAMME DE GANTT .....	34
FIGURE 2.4: TYPOLOGIE DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT .....	38
FIGURE 2.6 : HIÉRARCHIE DE COMPLEXITÉ DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT MACHINE .....	46
FIGURE 2.7 : HIÉRARCHIE DE COMPLEXITÉ DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT EN FONCTION DES CONTRAINTES [17] .....	46
FIGURE 2.8: HIÉRARCHIE DE COMPLEXITÉ DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT EN FONCTION DES CRITÈRES [10].....	47
FIGURE 3.1: FLOW-SHOP CLASSIQUE [27].....	50
FIGURE 3.2: FLOW-SHOP HYBRIDE [27].....	54
FIGURE 4.1: CONCEPTION ARCHITECTURALE.....	61
FIGURE 4.2: LES RÉSULTATS OBTENUS .....	67

## Liste Des Tableaux

TABLEAU 1.1: DIFFERENCE ENTRE LES TYPES DE MODELISATIONS DES CHAINES LOGISTIQUES [13] ...	22
TABLEAU 2.1: CLASSIFICATION DE GRAHAM .....	39
TABLEAU 2.2: INTERPRETATION DES NOTATIONS DU CHAMP A1 .....	39
TABLEAU 2.3: INTERPRETATION DES PRINCIPALES NOTATIONS POSSIBLES DE SOUS-CHAMPS DU CHAMP B .....	39
TABLEAU 2.4: INTERPRETATION DES PRINCIPALES NOTATIONS DU CHAMP $\Gamma$ .....	40
TABLEAU 2.5: TEMPS OPERATOIRES POUR 3 JOBS ET 3 MACHINES .....	42
FIGURE 2.5: DIAGRAMME DE GANTT D'UNE SOLUTION DU PROBLEME F3 PMTN C <sub>MAX</sub> .....	42
TABLEAU 2.6 : CLASSE DE COMPLEXITE DES PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT MONOCRITERE .....	47
TABLEAU 4.1: LES RESULTATS DE SIMULATION .....	69

# Introduction générale

Les chaînes logistiques, également connues sous le nom de chaînes d'approvisionnement, représentent un réseau complexe de processus, d'infrastructures et de partenariats qui assurent un flux efficace des produits, des services et des informations depuis le point de production jusqu'au consommateur final. Ces réseaux jouent un rôle crucial dans l'économie mondiale, en connectant les producteurs, les fournisseurs, les distributeurs et les vendeurs à travers le globe.

On peut retrouver l'apparition des chaînes logistiques à l'origine du commerce, mais elles ont connu une évolution majeure avec l'émergence de la mondialisation et des technologies contemporaines. De nos jours, les chaînes logistiques sont devenues des systèmes extrêmement avancés, qui exploitent des technologies comme l'automatisation, l'intelligence artificielle et l'Internet des objets afin d'améliorer l'efficacité et la visibilité des opérations.

Une logistique performante peut offrir de multiples bénéfices, tels qu'une diminution des dépenses, une amélioration de la qualité, une hausse de la satisfaction des clients et une gestion plus efficace des risques. Toutefois, elles font face à des obstacles tels que la fluctuation des marchés, les interruptions de la chaîne d'approvisionnement et les contraintes réglementaires.

Au cours de la dernière décennie, le domaine de l'optimisation basée sur la simulation s'est énormément développé et un grand nombre de travaux ont été effectués. Le travail présenté dans cette mémoire, 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.

Notre objectif était d'élaborer un outil pour l'analyse de l'efficacité 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. 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 intéressés à l'étude de l'optimisation à base de simulation pour la chaîne logistique.

Nous commençons notre mémoire par une introduction générale qui fixe l'objectif assigné à ce travail. Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres qui nous permettront de présenter les différents aspects de notre travail.

Le premier chapitre est dédié à la description des chaînes d'approvisionnement : leurs définitions, leurs conceptions, leur gestion et leur prise de décision aux différents niveaux de la chaîne.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les concepts généraux sur l'ordonnancement dans la production qui touchent aux problèmes étudiés.

Le troisième chapitre, nous présentons de manière plus détaillée les systèmes de production de type Flow-Shop et Flow-Shop hybride.

Le dernier chapitre nous présentons une vue de l'ensemble de l'approche utilisée, sa structure générale ainsi que ses objectifs. Nous allons passer à la conception et la mise en œuvre. Enfin, nous analysons et commentons les résultats numériques obtenus.

Finalement, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

# **CHAPITRE 1 : LES CHAINES LOGISTIQUES**

### 1.1 Introduction

L'organisation et la coordination de tous les flux de marchandises, le stockage et la gestion des emplacements dans les entrepôts, les centres de production et de distribution, ainsi que la synchronisation des opérations de transport interne et externe des produits, font partie de la chaîne logistique. Dans ce chapitre nous présentons les chaînes logistiques : leurs définitions, leurs Structures, leurs fonctionnements, leur gestion, et finalement leur optimisations et modélisations. Bien sûr notre présentation n'est pas exhaustive, mais nous essayons de donner les notions nécessaires pour comprendre notre problématique sans pour autant être un spécialiste de chaîne logistique ou d'ordonnancement.

### 1.2 Les chaînes logistiques

Actuellement, les entreprises doivent s'ajuster à la fluctuation du marché afin de pouvoir survivre dans un contexte extrêmement concurrentiel et compétitif. Les clients sont bien plus exigeants en raison des multiples options qui leur sont proposées. Il est compliqué de garantir la satisfaction des clients tout en réduisant les coûts. En plus de cela, prenons en compte les avancées technologiques dans le domaine de l'information et de la communication qui ont transformé la façon dont les entreprises doivent être gérées. Ces entreprises se développent de plus en plus, incluent de plus en plus de succursales et sont de plus en plus internationales, elles n'ont presque plus de nationalité. Cette situation récente a engendré de nouveaux défis. Le défi de s'ajuster à la mondialisation et d'en tirer les bénéfices. La modélisation des entreprises ou des processus qui conduisent à la création, à la production ou au développement de nouveaux produits ou services en chaîne logistique a émergé et est devenue indispensable dans les grandes organisations. De nos jours, il est indéniable que la gestion de production traditionnelle est désormais remplacée par la gestion de la chaîne logistique afin de répondre aux nouvelles attentes du marché, aux nouveaux concurrents et aux nouvelles connexions entre les entreprises et leurs partenaires. En résumé : tout évolue!

Il est nécessaire que les entreprises s'ajustent à cette nouvelle réalité, ce qui implique :

- Une réactivité très supérieure.
- Une baisse significative des coûts.

- Une nette amélioration de la qualité et du service du client.
- De meilleures performances.

La notion de chaîne logistique inclut le terme « logistique » qui vient d'un mot grec qui signifie l'art du raisonnement et du calcul [1]. La logistique est apparue en premier lieu dans un contexte militaire qui concernait tout ce qui est nécessaire (physiquement) à l'application sur le terrain des décisions stratégiques et tactiques. Certains remontent même jusqu'au temps d'Alexandre le grand [2] et ils mettent en évidence le sens qu'il avait pour gérer la chaîne logistique de son armée. On peut dire qu'Alexandre le grand était un précurseur.

Après la logistique militaire vient la logistique industrielle, celle-ci repose plus particulièrement sur les activités de soutien à la production. Elle est apparue à la fin de la seconde guerre mondiale, notamment avec la reconversion dans les entreprises des spécialistes militaires de la logistique. Depuis, la notion de logistique a connu des changements en raison de l'évolution du marché et des systèmes industriels. De nos jours, le mot « logistique » peut être interprété de différentes manières, et certains estiment que le concept de logistique est en lui-même une problématique.

Un synonyme de « logistique » pourrait être « gestion des flux » mais la logistique ne se limite pas à la gestion des flux, elle nécessite également la conception de systèmes physiques qui vont créer et déplacer les flux, de manière interne sur un même site de production ou de manière externe entre plusieurs sites de production au sein d'un groupe ou d'un réseau d'entreprises.

Dans un contexte économique instable, et sous la pression d'une concurrence croissante, des cycles de produits de plus en plus court et de systèmes informatiques, juridiques et financiers beaucoup plus complexes, les entreprises doivent améliorer leurs performances en optimisant leurs ressources et en réduisant leurs coûts. Fournir le produit ou le service désiré par le client le plus rapidement possible, moins cher et plus performant que ceux de ses concurrents sur le marché est le souci majeur de chaque entreprise opérant à l'échelle locale et/ou internationale. Quel que soit le domaine d'activité (santé, industrie, transport...) la performance de l'entreprise a une influence sur la satisfaction des clients et leur fidélisation, ainsi que sur les résultats

de l'entreprise. Étant donné la réalité de la globalisation, les experts anticipent que dans l'avenir, si cela n'est pas déjà en cours, la compétition ne se fera plus entre entreprises, mais plutôt entre chaînes logistiques.

### 1.2.1 Définitions

La chaîne logistique comprend toutes les étapes nécessaires à la production d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction de la matière première jusqu'à la livraison au client final, en passant par les étapes de transformation, de stockage et de distribution. Actuellement, la chaîne logistique est de plus en plus considérée comme une toile qui regroupe plusieurs des activités mentionnées, ce qui s'explique par la complexité des organisations actuelles et leur dimension internationale. La chaîne logistique comprend également les flux d'information et les flux financiers, en plus des flux de matières. Toutes les étapes de transformation ou de distribution peuvent entraîner l'implication de nouveaux acteurs, que ce soit de nouveaux fournisseurs ou de nouveaux clients intermédiaires, ainsi que des flux d'informations nouveaux.

Il existe énormément de définitions de la chaîne logistique dans la littérature. C'est un sujet passionnant car nouveau et porteur de progrès. Tayur et al [3] définissent la chaîne logistique comme « un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients, et des flux d'information dans les deux sens ». Lambert et al [3] proposent une définition simple : « Une chaîne logistique est l'ensemble des firmes qui amènent des produits ou des services sur le marché », ce qui est une définition très généraliste. Lee et Bellington [4] donnent une vision plus opérationnelle : « un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client ». Le parallélisme entre la chaîne logistique et l'organisation en réseau est très significative, ça met en évidence la complexité de sa gestion étant donné qu'elle est le point qui rassemble plusieurs acteurs qui participent à un même projet ou à défaut ils participent tous au processus de création, ou développement d'un service ou d'un produit. New et al [5] vont dans le même sens et proposent de représenter les activités et les entreprises impliquées dans cette chaîne qui commence à l'extraction

de la matière première en passant par les entreprises de production, les grossistes, les détaillants jusqu'au client final.

### 1.2.2 Structure d'une chaîne logistique

Il est clair que toutes les chaînes logistiques ne se ressemblent pas. Lin et Shaw les classent dans [6] en trois types que l'on distingue par leur structure physique, le type d'opérations, leurs objectifs, les types de produits, les niveaux d'assemblage, le temps de vie du produit et le besoin de stock. Ces trois types sont des chaînes purement convergentes, caractéristiques de l'industrie automobile ou aéronautique, des chaînes avec assemblage à différenciation retardée, caractéristiques du secteur informatique, et enfin les chaînes ayant des changements d'environnement rapide, comme dans l'industrie textile. Beamon et Chen définissent eux quatre familles [7] qui seraient « convergents, divergents, conjoints et généraux ». Pour définir ces familles, on suit le trajet des matières dans la chaîne :

- Dans une chaîne convergente, la matière qui circule entre les sites converge vers un seul et même site qui est logiquement le lieu d'assemblage final. L'industrie navale ou encore aéronautique sont des bons exemples de ce type de chaîne.
- Dans une chaîne divergente, à l'opposé du cas précédent, la matière part d'un point unique et se distribue à travers la chaîne. Cela concerne par exemple l'industrie minière.
- Une chaîne que les auteurs nomment « conjointe » est la juxtaposition d'une chaîne convergente et d'une chaîne divergente. Ce cas de figure est illustré par la figure 1.1.

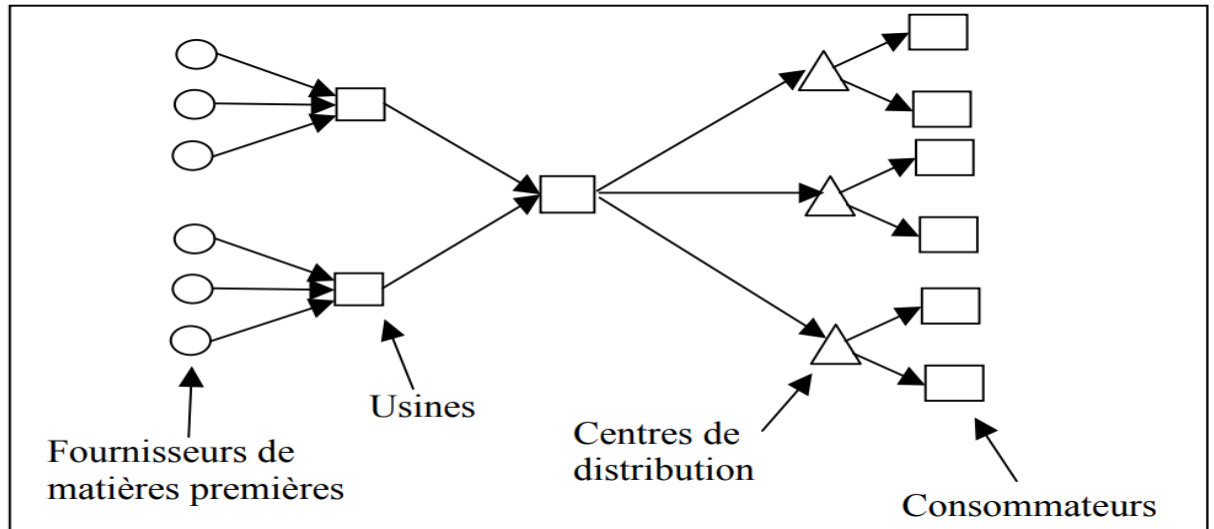


Figure 1.1: Structure d'une chaîne logistique conjointe [8]

- Enfin les chaînes mixtes ne sont ni totalement convergentes ni totalement divergentes. Elles concernent par exemple l'industrie automobile dont, comme nous l'avons dit, la partie amont est plutôt convergente alors que la partie aval est divergente.

### 1.2.3 Fonctions de la chaîne logistique

La définition suivante de la chaîne logistique donnée par Ganeshan and Harisson [9] donne un aperçu des fonctions de la chaîne logistique : « une chaîne logistique est 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 ». Plus généralement, les fonctions d'une chaîne logistique vont de l'achat des matières premières à la vente des produits finis en passant par la production, le stockage et la distribution.

- L'approvisionnement :

Il constitue la fonction le plus en amont de la chaîne logistique. 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, et ainsi à avoir plus de marges financières. Les délais de livraison des fournisseurs et la fiabilité de la distribution influent plus que le temps de production sur le niveau de stock ainsi que la qualité de

service de chaque fabricant. La tendance générale des relations clients/fournisseurs va vers plus de coopération via un partage d'informations plus rapide en utilisant les nouveaux systèmes d'informations basées sur les technologies de l'information et de communication qui ont révolutionné les pratiques du passé où on était plutôt dans une configuration de face à face plutôt qu'une collaboration bénéfique pour l'ensemble des participants.

- La production :

La fonction de production est au cœur de la chaîne logistique, il s'agit là des compétences que détient l'entreprise pour fabriquer, développer ou transformer les matières premières en produits ou services. Elle donne quelle capacité à la chaîne logistique pour produire et donne ainsi un indice sur sa réactivité aux demandes fluctuantes du marché. Si les usines ont été construites avec une grande capacité de production, parfois excessive, alors on peut être réactif à la demande en présence de quantités supplémentaire à faire, cet environnement a l'avantage d'être disponible pour des clients en cas de demandes urgentes, mais d'un autre côté une partie de la capacité de production peut rester inactive ce qui engendrent des coûts et dépenses en plus. D'un autre côté si la capacité de production est limitée, la chaîne logistique a du mal à être très réactive et donc peut perdre des parts du marché vu qu'elle n'est pas capable de répondre favorablement à certaines demandes. Il faut donc trouver un équilibre entre réactivité et coûts.

- Le stockage :

Le stockage inclut toutes les quantités stockées tout au long du processus en commençant par le stock de matières premières, le stock des composants, le stock des en-cours et finalement le stock des produits finis. Les stocks sont donc partagés entre les différents acteurs : les fournisseurs, le producteurs et les distributeurs. Ici aussi se pose la question de l'équilibre à trouver entre une meilleure réactivité et la réduction des coûts. Il est évident que plus on a de stocks, plus la chaîne logistique est réactive aux fluctuations des demandes sur le marché. Cependant, avoir des stocks engendre des coûts et des risques surtout dans le cas de produits périssables ou bien des produits dont la rapidité d'innovations est telle qu'une nouvelle gamme du même produit mise sur le marché par un concurrent puisse rendre obsolètes les quantités de ce produit en

stock et ainsi une perte importante. La gestion des stocks est l'une des clés de la réussite et l'optimisation de toute une chaîne logistique. Une meilleure gestion de cette fonction peut engendrer des économies importantes, l'expérience de DELL dans ce domaine est un exemple très connu. En outre, avec l'avènement des techniques de management dite de « juste à temps » (just in time) beaucoup d'entreprises tendent vers avoir un stock nul, ou bien « juste » ce qu'il faut pour produire et satisfaire les commandes. Mais ceci n'est évidemment pas sans risques.

- Distribution et transports :

La fonction transport intervient tout au long de la chaîne, le transport des matières premières, le transport des composants entre les usines, le transport des composants vers les centres d'entreposage ou vers les centres de distribution, ainsi que la livraison des produits finis aux clients. Le rapport entre la réactivité de la chaîne et son efficacité peut être aussi vu par le choix du mode de transport. Les modes de transport les plus rapides comme par exemple les avions, sont très coûteux, mais permettent de réagir très vite et ainsi de satisfaire les demandes non prévisibles. Les modes de transport par voies ferrées ou par camions sont plus efficaces du point de vue des coûts engendrés mais moins rapides. L'ensemble des partenaires peut choisir de combiner ces modes de transport et de les adapter à certaines situations selon l'importance de la demande et le gain total engendré. Les problèmes liés à la distribution et au transport peuvent être vus sous plusieurs angles. On peut chercher à trouver les meilleures routes possibles pour visiter les points de collecte et/ou de distribution (Vehicle routing problems, problèmes de tournées des véhicules), ou bien, comme dit plus haut, chercher les meilleurs modes de transports, ou bien les quantités des produits qui doivent être transportées aux clients tout en minimisant le coût global des transports et des stocks. En effet, selon les études [10] les coûts de transport et distributions constituent le tiers des coûts opérationnels globaux d'une chaîne logistique, ce qui rend leur optimisation un défi majeur pour les entreprises.

- La vente :

La fonction de vente est la fonction ultime dans une chaîne logistique, son efficacité dépend des performances des fonctions en amont. Si on a bien optimisé pendant les étapes précédentes, alors on facilite la tâche du personnel chargé de la

vente, car ils pourront offrir des prix plus compétitifs que la concurrence, sinon les marges seront très étroites et les bénéfices pas très importants, voire même engendrer des pertes.

### **1.2.4 La gestion de la chaîne logistique ou supply chain management**

La gestion de la chaîne d'approvisionnement, un terme utilisé au niveau international depuis les années 1980, fait référence à la gestion de la chaîne logistique. Il a évolué à partir de termes tels que la logistique et la gestion des opérations. Dans un environnement logistique complexe, les outils tels que la gestion de la production, la planification et le pilotage deviennent insuffisants en raison des nouvelles demandes et de la réorganisation des réseaux. La gestion de la chaîne d'approvisionnement englobe les approches, les méthodes et les outils permettant de répondre à ces besoins.

La gestion de la chaîne d'approvisionnement est un outil de performance pour les entreprises, qui vise à améliorer les niveaux de service, à réduire les coûts et à créer de la valeur en favorisant les relations avec les fournisseurs et les clients. Elle optimise les processus pour vendre davantage, répondre aux attentes des clients et mieux organiser les processus de production et de flux afin de réduire les coûts. Cependant, il est difficile de donner une définition universelle de la gestion de la chaîne d'approvisionnement en raison de son évolution multidisciplinaire et de l'absence de définition universelle.

Mentzer et al [11] définissent la gestion de la chaîne d'approvisionnement comme la coordination systématique et stratégique des fonctions opérationnelles classiques au sein d'une entreprise et entre les partenaires de la chaîne logistique afin d'améliorer les performances à long terme de chaque entreprise et de l'ensemble de la chaîne. Cette définition est souvent appliquée aux entreprises ayant des chaînes logistiques multiples, telles que les entreprises dominantes ou les chaînes logistiques collaboratives.

La gestion de la chaîne d'approvisionnement est la coordination de la production, du stockage, de la localisation et du transport entre tous les participants de la chaîne logistique afin d'atteindre le meilleur équilibre de productivité et d'efficacité sur le marché des services. Elle diffère de la logistique traditionnelle, qui se limite à une

seule entreprise et se concentre sur la gestion des stocks, la distribution et le marketing. La gestion de la chaîne d'approvisionnement est cruciale pour la gestion de la chaîne logistique et a été utilisée pour la première fois dans de telles configurations.

La gestion de la chaîne d'approvisionnement repose sur le flux d'informations pour la prise de décision, la qualité des décisions et leur impact sur les décisions de la chaîne étant cruciaux. Cependant, le succès des systèmes de gestion de la chaîne d'approvisionnement est souvent critiqué parce qu'ils reposent sur des notions préconçues. Le partage d'informations et la démonstration de la confiance et de l'absence de méfiance entre les partenaires sont essentiels pour améliorer les critères de la chaîne tels que les niveaux de stock, la qualité du service et la planification globale. La capacité des partenaires à partager des informations et à synchroniser leurs activités est un facteur clé de la gestion logistique globale.

### **1.2.5 Optimisation de la chaîne logistique**

La chaîne logistique étudie la gestion des flux, de supplier à client et à consommateur final, en l'environnement globalisation. Il s'agit de coordonner tous les processus pour atteindre le niveau de performance. La chaîne logistique assemble plusieurs partenaires, et l'optimisation est complexe, étant difficile à trouver. Un optimum global est rarement obtenu en rassemblant des optima locales.

Le partenariat se concentre généralement sur une attitude de collaboration visant à minimiser les coûts globaux et à maximiser les gains, ce qui peut nécessiter des efforts organisationnels et un alignement stratégique, tels que des procédures de gestion collaborative pour fournir le meilleur produit au bon moment.

Cette optimisation rencontre des problèmes qui brisent l'approche par broyage et rendent l'approche optimisante. Nous allons identifier certains de ces problèmes, en nous inspirant de Portman (ISDP 32) :

- La qualité de l'information est influencée par des facteurs tels que la durée estimée des opérations, les pannes de machines, les absences du personnel, les retards de fret et la non-conformité avec les matériaux initiaux.

- Les décisions concernant les services dans les entreprises peuvent entraîner des conflits, des indicateurs de performance, des problèmes de confiance, de sécurité, de partage et de circulation de l'information, nécessitant un comportement global gagnant.
- Les critères de performance et de qualité sont antagonistes en raison des différents acteurs concernés : actionnaires, clients, employés.
- Il existe de nombreux systèmes de production et de distribution avec des hypothèses uniques, qui contribuent à l'existence d'outils génériques de prise de décision. Ces systèmes comprennent divers processus de fabrication, ressources de production, tailles et structures d'ateliers, machines, critères de performance et minimisation des coûts. Ces facteurs contribuent à la diversité des outils de prise de décision et à leur efficacité.
- Contraintes de production : préemption autorisée ou non autorisée, chevauchement autorisé ou non entre les opérations, fabrication par lots ou batches de type maximum ou somme, temps de transport, limitation des stockages, production cyclique ou à la commande.
- Diversité des systèmes de transport et de distribution.
- Le désir absolu d'un optimum global parfait conduit souvent à des calculs exponentiels des calculs exponentiels qui prennent tellement de temps qu'il devient inimaginable de les prendre pour des solutions (NP-hard-to-solve problems), même si l'on travaille souvent sur des données imprécises. Cela signifie que les méthodes de solutions exactes ne sont envisagées que pour les petits problèmes, et que les méthodes approximatives sont le plus souvent utilisées. Les méthodes approximatives sont plus souvent utilisées pour les problèmes à l'échelle industrielle.
- Les changements dans la structure d'un réseau ont un impact sur l'efficacité de la prise de décision opérationnelle, qui doit être considérée en relation avec la conception de la chaîne.
- La chaîne logistique incomplète consiste à dépasser la chaîne interne pour prendre en compte à la fois les clients et les fournisseurs, ce qui permet à la chaîne

de mieux comprendre leurs besoins et de s'adapter pour améliorer la qualité du service.

Afin de résoudre ces problèmes, il est nécessaire de créer de nouvelles relations de partenariat entre fournisseurs et clients. Il est essentiel que ces relations soient durables et offrent aux entreprises la possibilité de s'intégrer et de coordonner la prise de décisions à l'échelle de la chaîne, afin d'être réactives et efficaces face aux fluctuations des marchés qui demeurent extrêmement imprévisibles.

### 1.2.6 Modélisation des chaînes logistiques

La chaîne logistique étant un système complexe et dynamique, ajouté à cela un environnement instable qui génère de nombreuses incertitudes. La difficulté de la prise en compte de ces incertitudes fait que la plupart des modèles proposés pour modéliser les chaînes logistiques utilisent des hypothèses restrictives, et parfois simplistes [12]. La modélisation de ces systèmes complexes permet une meilleure compréhension et une meilleure gestion de ces systèmes. Un modèle n'est qu'une représentation simplifiée d'un système réel, qui permet de l'analyser, le contrôler et le piloter. Ils sont à la base des systèmes d'aide à la décision. Nous allons voir trois types de modélisations : modèles conceptuels, modèles mathématiques, et modèles par simulation [13].

- Les modèles conceptuels

Les modèles conceptuels sont de loin les plus simples. Il s'agit en fait d'une description basique d'un système économique comme la chaîne logistique qui peut s'exprimer sous formes de diagrammes ou d'explications verbales. Le format utilisé dépend en grande partie de l'expérience du modélisateur, ceux avec une grande expérience font des diagrammes détaillés pour réduire l'ambiguïté, tandis que ceux avec une moindre expérience se basent sur une analyse par scénario. Dans ces modèles, il faut trouver un bon équilibre entre précision et aisance de communication. Ces modèles sont limités car difficiles à mettre en œuvre dans le cas d'organisations très complexes, et surtout ils ne donnent pas d'orientations quant au contrôle et au pilotage de la chaîne.

- Modèles mathématiques

Les modèles mathématiques sont très utilisés pour la conception des chaînes logistiques et pour l'optimisation des coûts. Ils consistent à modéliser un système réel par un ensemble d'équations exprimant les contraintes et les objectifs. Contrairement aux modèles conceptuels qui eux aident seulement à la compréhension du système, les modèles mathématiques résolvent les problèmes d'optimisation. Une autre différence avec les modèles conceptuels est que l'utilisation des modèles mathématiques requiert 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 outils de recherche opérationnelle sont à la base de beaucoup de systèmes d'optimisation des supply chain management. L'inconvénient avec les modèles mathématiques est qu'ils font des restrictions trop importantes sur certaines hypothèses. Un autre inconvénient, et pas des moindres, est le temps d'exécution nécessaire pour résoudre des problèmes de tailles réalistes. Ainsi, pour des problèmes avec de grandes tailles, les industriels préfèrent utiliser des solutions approchées obtenues dans des délais raisonnables

- Modèles par simulation

Les modèles par simulations sont très pratiques dans le cas de systèmes où il est difficile de représenter toutes les hypothèses par des équations, et de ce fait, on ne peut pas utiliser les modèles mathématiques. Ces modèles essaient d'imiter le comportement des composants d'un modèle et donc de pouvoir faire des prévisions et des évaluations de performances. Ils ont la capacité de capturer les incertitudes et de traiter l'aspect dynamique des systèmes complexes et des systèmes à grandes échelles. De nombreux modèles ont été proposés pour la simulation et la modélisation des chaînes logistiques. Hermann et al [14] proposent un nouveau cadre de simulation et des modèles hiérarchiques pour capturer les activités spécifiques au sein de la chaîne logistique. Dans sa thèse, Ding [15] propose une approche d'optimisation basée sur la simulation pour la conception des chaînes logistiques appliquée à l'industrie automobile et textile. Beaucoup de travaux de recherches se sont intéressés à ces modèles.

Le tableau ci-dessous illustre les différences entre les trois types de modélisation.

	Modèles conceptuels	Modèles Mathématiques	Modèles par Simulation
Représente la chaîne comme	Diagrammes et Descriptions	Formules et Equations	Objets et interactions
Solutions trouvées Par	Raisonnement verbal	Les solveurs (comme Cplex ou Express)	Expériences (monte carlo)
Meilleur application pour	Partage de la Comprehension	Performances Optimales	Prévisions realists

Tableau 1.1: différence entre les types de modélisations des chaînes logistiques [13]

### 1.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts associés aux chaînes logistiques, et à travers toutes les définitions que nous avons fournies, nous constatons la difficulté de situer le concept des chaînes logistiques. Cette dernière dépend de la nature du produit ou du service fourni et de la nature des relations entre les participants. Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les concepts liés à l'ordonnement de la production.

## **CHAPITRE 2 : ORDONNANCEMENT DE PRODUCTION**

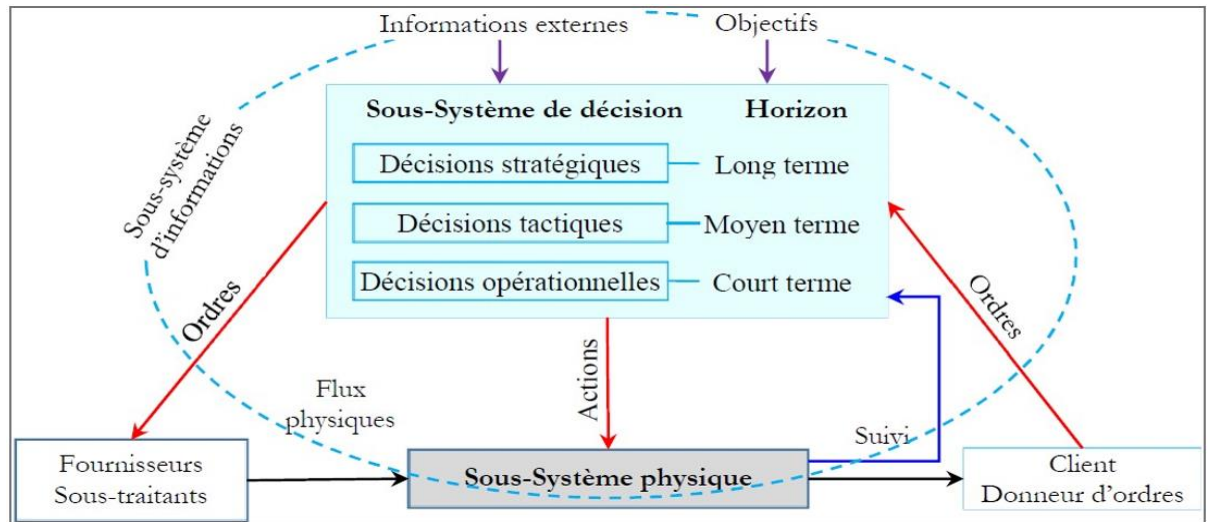
### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on abordera les problèmes d'ordonnancement dans les chaînes logistiques ; les problèmes d'ordonnancement en ateliers, d'une manière générale, nous essayons de donner les notions nécessaires pour comprendre notre problématique. Nous exposons également quelques concepts sur la théorie de complexité afin de mieux comprendre la difficulté de la résolution de certains problèmes.

### 2.2 La Gestion de production

Les entreprises industrielles sont obligées de réadapter leur système de production afin d'augmenter la qualité de leurs produits, de mieux gérer leurs ressources, de réduire leur coût de revient et d'augmenter leur flexibilité afin de rester compétitives face aux défis de la mondialisation et de la concurrence.

Ainsi, la gestion de production apparaît comme le guide essentiel de l'entreprise industrielle pour atteindre cet objectif. En effet, cette gestion doit organiser le fonctionnement du système de production et mieux le gérer. Les systèmes de production peuvent être vus comme un ensemble de ressources divers (matériels, humains, etc.) qui interagissent et interfèrent dans le but de produire des biens ou services. Ces derniers peuvent être des systèmes extrêmement complexes et difficiles à gérer en raison de toutes leurs composantes fonctionnelles, telles que la fabrication, l'achat, la distribution et la maintenance. De nombreuses méthodes ont été examinées dans le but de mieux comprendre comment ils fonctionnent et de mieux les comprendre. En appliquant la théorie des systèmes aux systèmes de production, il est proposé de les diviser en trois sous-systèmes : le sous-système physique de production, le sous-système de décision et le sous-système d'information qui s'intègrent afin d'assurer la pérennité et la compétitivité de l'entreprise industrielle comme illustrée dans la figure 2.1.



**Figure 2.1: Décomposition d'un système de production [16]**

Le sous-système physique de production englobe tout les ressources humaines et physiques nécessaires pour la transformation des matières premières en produits finis.

Le sous-système de décision contrôle le système physique de production à travers l'organisation des différentes activités en prenant des décisions basées sur les données transmises par le sous-système d'information.

Le sous-système d'information intervient à plusieurs endroits, entre les sous-systèmes de décision et de production et à l'intérieur même du sous-système de décision, pour la gestion des informations utilisées lors de prises de décision, et du sous-système physique de production, pour la création et le stockage d'informations de suivi par exemple [17]. Donc, son rôle peut se résumer à la collecte, le stockage, le traitement et la transmission d'informations.

Les deux sous-systèmes décisionnels et informationnels traitent les fonctions rattachées directement à la production à savoir, la gestion de stock, la gestion des ressources, la maintenance, la planification, etc. L'association de ces deux derniers sous-systèmes constitue le système de gestion de production, évoqué dans cette section.

En fait, la gestion de production assure l'organisation du système de production afin de fabriquer les produits en quantités et qualités définies, ainsi dans un temps voulu compte tenu des moyens humains ou technologiques disponibles.

L'objectif de la gestion de production est de gérer les systèmes de production au mieux.

Cette gestion s'effectue par un ensemble de décisions qui peuvent être hiérarchisées suivant des granularités et des horizons temporels différents. Ces décisions sont habituellement classées selon trois catégories introduites par Anthony [18] et reprises dans [19] en gestion de production, à savoir : les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles.

- **Décisions stratégiques**

Les décisions stratégiques définissent la politique de l'entreprise à long terme. Ces décisions portant sur la stratégie de l'entreprise sont prises par la direction générale de l'entreprise et portent essentiellement sur la gestion des ressources durables afin que celles-ci soient toujours suffisantes pour assurer la pérennité de l'entreprise. Les ressources visées peuvent être des ressources humaines (compétences à posséder, plans de formation), équipements (bâtiment, machines), des informations de production (les produits à lancer ou développer) ou des données techniques, etc.

- **Décisions tactiques**

Les décisions tactiques définissent la politique de l'entreprise à moyen terme. Ces décisions sont prises par le personnel d'encadrement de l'entreprise et elles sont destinées à obtenir la meilleure exploitation des moyens mis en œuvre.

En effet, ces décisions s'inscrivent dans un cadre logique dessiné par les décisions stratégiques. Comme exemples de décisions tactiques, on peut citer : la planification de la production qui est une programmation prévisionnelle de la production pour une période qui varie généralement entre 6 et 18 mois (selon l'entreprise), les problèmes d'allocation (des fournisseurs ou des produits), la définition des niveaux de stock ainsi que le choix des modes de transport, etc.

- **Décisions opérationnelles**

Les décisions opérationnelles définissent la politique de l'entreprise à court terme. Ces décisions assurent la flexibilité quotidienne nécessaire pour faire face aux fluctuations prévues de la demande et des disponibilités de ressources et réagir aux aléas, dans le respect des décisions tactiques. Généralement, ces décisions sont prises par des responsables d'activités, des chefs d'équipe ou des agents maîtrise.

Parmi les décisions opérationnelles concernant la gestion de la production, on trouve par exemple la gestion des stocks et l'ordonnancement de la production. La gestion des stocks assure la mise à disposition des produits et des composants alors que l'ordonnancement consiste à une programmation prévisionnelle détaillée des ressources mobilisées (opérateurs, équipements et outillages) afin de fabriquer des produits définis par la planification.

En effet, l'ordonnancement constitue une classe importante de ces décisions et joue un rôle privilégié dans la gestion informatisée des flux de production au sein de l'entreprise. Il s'occupe de la réalisation des décisions venant des niveaux supérieurs et couvre ainsi un ensemble d'actions qui transforment les décisions de fabrication définies par le programme directeur de production en instructions d'exécution détaillées destinées à piloter et contrôler à court terme l'activité des postes de travail dans l'atelier [20].

### 2.3 L'ordonnancement de la production

La théorie d'ordonnancement est une branche de la recherche opérationnelle, qui consiste à ordonner un ensemble d'opérations tout en satisfaisant un ensemble de contraintes et en optimisant un ou plusieurs objectifs. L'ordonnancement joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs d'activités à savoir, en : informatique (ordonnancement de processus), administration (établissement d'un emploi du temps, gestion des ressources humaines), industrie (gestion des ateliers de production), construction (gestion des chantiers routiers), logistique (gestion des livraisons et des stocks). Parmi ces nombreux types de problèmes d'ordonnancement, nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette thèse aux problèmes d'ordonnancement d'ateliers dans les systèmes de production.

Un atelier de production est un espace physique où la fabrication se déroule. Il est composé de ressources humaines et matérielles, et caractérisé par les types de tâches à exécuter, les types de ressources et la gamme de fabrication.

Nombreuses sont les définitions proposées au problème d'ordonnancement d'atelier, nous tirons de la littérature les trois définitions ci-dessous :

Définition 1:

Scheduling is the process of organizing, choosing, and timing resource usage to carry out all the activities necessary to produce the desired outputs at the desired times, while satisfying a large number of time and relationship constraints among the activities and the resources. [21] Et ça veut dire La planification est le processus d'organisation, de choix et de chronométrage de l'utilisation des ressources pour réaliser toutes les activités nécessaires pour produire les résultats souhaités aux moments souhaités, tout en satisfaisant un grand nombre de contraintes de temps et de relations entre les activités et les ressources.

### Définition 2:

Scheduling is concerned with the allocation of scarce resources to activities with the objective of optimizing one or more performance measure. [22] Et ça veut dire L'ordonnancement concerne l'affectation de ressources limitées à des activités dans le but d'optimiser une ou plusieurs mesures de performance.

### Définition 3:

Scheduling is a decision-making process that is used on a regular basis in many manufacturing and services industries. It deals with the allocation of resources to tasks over given time periods and its goal is to optimize one or more objectives. [23] Et ça veut dire L'ordonnancement est un processus décisionnel utilisé régulièrement dans de nombreuses industries manufacturières et de services. Il traite de l'affectation des ressources aux tâches sur des périodes données et vise à optimiser un ou plusieurs objectifs.

D'après les définitions ci-dessus, on retrouve l'aspect commun de l'affectation de ressources aux tâches. Donc nous pouvons dire que l'ordonnancement d'ateliers consiste à programmer dans le temps l'exécution des tâches selon la disponibilité des ressources pour répondre à un ou plusieurs objectifs, tout en respectant les contraintes techniques de fabrication.

### **2.3.1 Les différents éléments d'un problème d'ordonnancement**

Dans la définition du problème d'ordonnancement, quatre éléments fondamentaux interviennent : les tâches, les ressources, les contraintes et les gammes. Alors, la formulation et la description de ce problème se font par la détermination de ces quatre éléments dits de base.

- Les tâches

une seule étape dans un projet en plusieurs étapes. Elle est accomplie dans un délai fixé et doit contribuer aux objectifs liés au travail. Tout comme la gestion de projet est la coordination de tâches individuelles, elle peut être décomposée en sous-tâches, qui devraient également avoir des dates de début et de fin claires pour l'achèvement.

Exécution d'une tâche : L'exécution se trouve complètement décrite par les caractéristiques suivantes :

- Identité (nom de la tâche),
- limites chronologiques bien définies,
- $d_i$  date de début de la tâche  $i$ ,
- $f_i$  date de fin de la tâche  $i$
- caractéristique de durées :  $t_i = f_i - d_i$  durée du travail,
- caractéristique de moyens : Il s'agit de divers moyens (matériels, personnel, fournitures, monnaie, etc.) qui sont nécessaires à la réalisation,
- relié à au moins une autre tâche du projet.

Dates et marges associées à une tâche :

- Date de début au plus tôt : La date de début au plus tôt d'une tâche est la date minimum à laquelle elle peut commencer, c'est donc la date avant laquelle un événement ne peut se réaliser.

- Date de début au plus tard : La date de début au plus tard d'une tâche est la date limite de sa réalisation. Après quoi le projet sera retardé.

- Date de fin au plus tôt : La date de fin au plus tôt d'une tâche est la date à laquelle elle se termine en commençant à sa date de début au plus tôt.

- Date de fin au plus tard : La date de fin au plus tard d'une tâche est la date minimum des dates de fin au plus tard des tâches qui la succèdent. Elle est la date à laquelle se termine si elle commence à sa date de début au plus tard.

- Marge totale : La marge totale d'une tâche est le délai qui peut lui être accordé pour son commencement sans qu'il y ait un retard dans la réalisation du projet.

- Marge libre : La marge libre d'une tâche est le délai accordé à son commencement sans la modification des marges totales des tâches postérieures. Un retard supérieur à la marge libre se répercute sur les tâches suivantes en diminuant leurs marges libres

La figure suivante donne une représentation de la tâche en désignant ses principales caractéristiques.

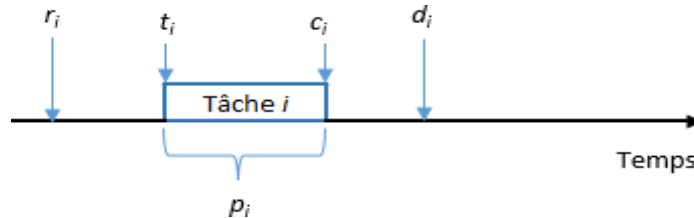


Figure 2.2: Caractéristique d'une tâche

Généralement, en ordonnancement d'atelier, le terme « tâche » correspond à une « opération » et le terme « travail » ou « job » désigne l'ensemble d'opérations constituant le même job.

- Les ressources

Les ressources sont les moyens techniques ou humains destinés à être utilisés pour la réalisation d'une ou plusieurs tâches, elles peuvent être de différentes natures (matérielles, humaines, financières).

On distingue deux types de ressources : les ressources renouvelables et les ressources consommables.

Une ressource est consommable si, après avoir été allouée à une tâche, elle n'est plus disponible pour les tâches suivantes. Comme l'argent, la matière première, etc.

Une ressource est renouvelable si, après avoir été allouée à une tâche, elle redevient disponible après la fin de cette tâche pour les tâches suivantes. Comme les machines, les processeurs, les fichiers, le personnel, etc. De plus il existe principalement dans le cas de ressources renouvelables, les ressources disjonctives (ou non partageables) qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois (machine, robot, etc.) et les ressources cumulatives (ou partageables) qui peuvent être utilisées par plusieurs tâches en même temps (équipe d'ouvriers, poste de travail, etc.).

- Les contraintes

On distingue trois grandes catégories de contraintes : temporelles, technologiques et de ressources.

Contraintes temporelles : Elles concernent les délais de fabrication imposés. Ces contraintes

Peuvent être :

— Des contraintes de dates butoirs, certaines tâches doivent être achevées avant une date préalablement fixée.

— Des contraintes d'antécédence, une tâche doivent précéder une tâche.

— Des contraintes de dates au plus tôt, liées à l'indisponibilité de certains facteurs nécessaires pour commencer l'exécution des tâches.

Contraintes technologiques : Elles sont décrites généralement dans les gammes de fabrication de produits.

Contraintes de ressources : Plusieurs types de contraintes peuvent être induits par la nature des ressources. À titre d'exemple, la capacité limitée d'une ressource implique un certain nombre à ne pas dépasser de tâche à exécuter sur cette ressource. Les contraintes relatives aux ressources peuvent être disjonctives, induisant une contrainte de réalisation des tâches sur des intervalles temporels disjoints pour une même ressource, ou cumulatifs impliquant la limitation du nombre de tâches à réaliser en parallèle. Il existe d'autres contraintes d'enchaînement temporelles, mais elles dépendent de certaines ressources.

- Les gammes

La gamme correspond à la description et à la mesure du procédé de fabrication. La gamme est un document qui :

— décrit l'ensemble des opérations d'élaboration du produit, dans l'ordre où elles sont exécutées (notion de succession ou de chronologie des opérations) ;

— permet lors de chaque lancement de connaître, pour les ressources utilisées (machine, main-d'œuvre) les temps d'occupation du poste de travail, donc les temps de charge et les coûts de revient ;

— est construit par le bureau des méthodes.

Il existe plusieurs sortes de gammes, parmi lesquelles on distingue :

Les gammes techniques : qui est dû essentiellement au choix prédéterminé de certaines tâches à passer sur des machines spécifiques.

Les gammes libres : qui est l'une des principales caractéristiques des problèmes d'ordonnancement à cheminement libre (cas du problème Open-shop). En effet, quand l'exécution des opérations est indépendante de l'ordre, il n'existe aucune contrainte de succession.

Les gammes linéaires : ou l'ordre d'exécution des opérations entièrement imposé et prédéterminé. Ce genre de gammes est présent dans le cas des problèmes d'ordonnancement à cheminement multiple, où chaque tâche a sa propre route à suivre autrement dit toutes les tâches ont des gammes prédéterminées, mais non identiques (cas du problème Job-Shop) et des problèmes d'ordonnancement à cheminement unique (toutes les tâches ont le même chemin (route ou gamme) à suivre (cas du problème Flow-Shop)).

Les gammes mixtes ou semi-linéaires : ou l'ordre d'exécution des opérations est partiellement déterminé, on trouve des tâches qui ont des gammes prédéterminées (on sait a priori la route à suivre par ces tâches), et d'autres pas.

### 2.3.2 Objectifs de l'ordonnancement

Le traitement de l'ordonnancement dans la littérature s'est tout d'abord orienté vers une optimisation monocritère. L'environnement manufacturier évoluant rapidement et la concurrence devant de plus en plus acharnée. Les objectifs des entreprises se sont diversifiés et le processus d'ordonnancement est devenu de plus en plus multicritère. Les critères que doit satisfaire un ordonnancement sont variés. D'une manière générale, on distingue plusieurs classes d'objectifs concernant un ordonnancement.

Les objectifs liés au temps : on trouve par exemple la minimisation du temps total d'exécution, du temps moyen d'achèvement, des durées totales de réglage ou des retards par rapport à la date de livraison.

Les objectifs liés aux ressources : maximiser la charge d'une ressource ou minimiser le nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches est des objectifs de ce type.

Les objectifs liés au coût : ces objectifs sont généralement de minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, de transport, etc.

### 2.3.3 Diagramme de GANTT

Un diagramme de Gantt est un outil graphique utile qui montre les activités ou les tâches effectuées en fonction du temps. Il est également connu sous le nom de présentation visuelle d'un projet où les activités sont décomposées et affichées sur un graphique qui le rend facile à comprendre et à interpréter.

Il est très important de comprendre l'interdépendance entre les activités pour en assurer le suivi, et les diagrammes de Gantt aident le gestionnaire de projet à le faire. Il transmet les informations sur l'achèvement des autres activités du projet. Ces informations sont importantes en raison des liens entre les différentes activités et si une activité est retardée, cela aura un impact sur les autres.

Microsoft Excel et MS-Project peut être utilisée pour créer des diagrammes de Gantt, en plus des autres logiciels indépendants disponibles sur le marché [12].

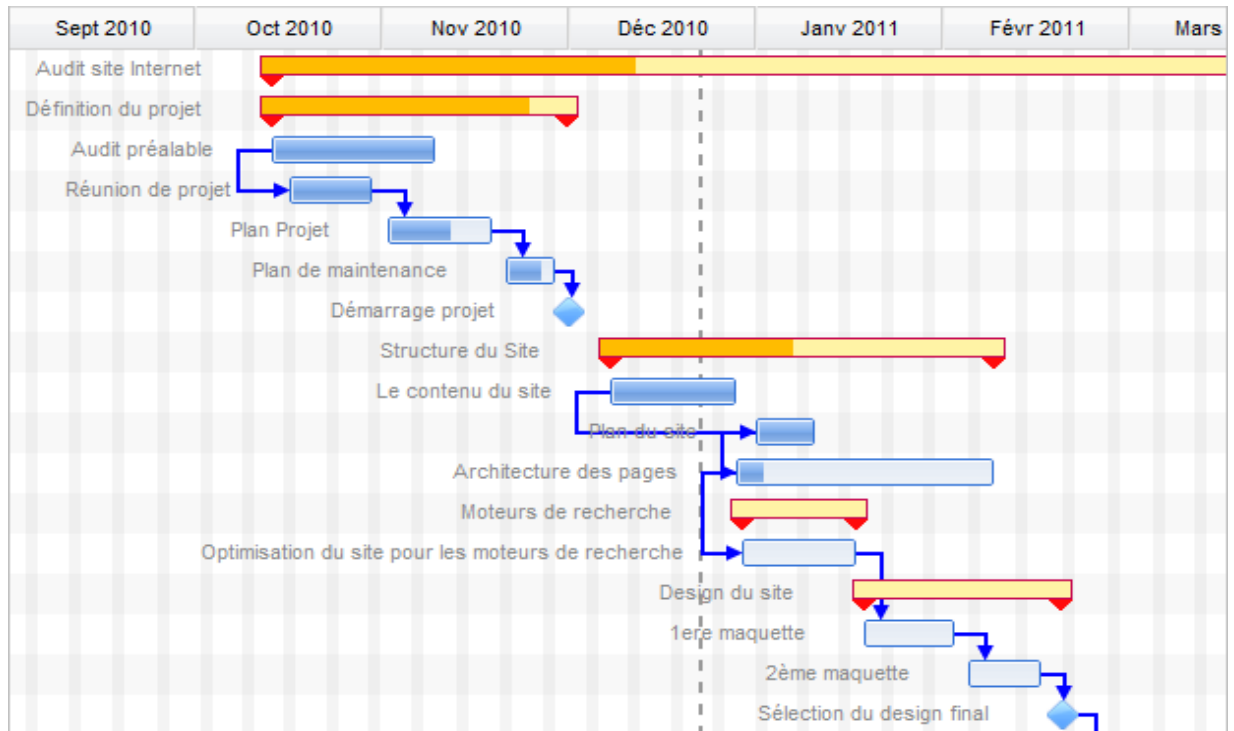


Figure 2.3 : Exemple d'un diagramme de GANTT

### 2.3.4 Classes d'ordonnancement

Ordonnements statique et dynamique : Si l'ensemble des informations nécessaires à la résolution d'un ordonnancement est fixé au départ (ensembles des tâches, des contraintes, des ressources, etc.), on est alors devant un problème d'ordonnancement statique [25].

Il y a une nuance entre la solution proposée qui est, généralement accompagnée d'un plan prévisionnel d'exécution des tâches, et l'exécution réelle de ces tâches. Si le plan n'est pas respecté et les objectifs sont modifiés, on est devant un problème d'ordonnancement dynamique qui nécessite une résolution d'une série de problèmes statiques et chaque étape doit débiter par une prise d'informations permettant d'actualiser le modèle à résoudre.

Ordonnements admissibles : un ordonnancement est dit admissible s'il respecte toutes les contraintes du problème à savoir les dates limitées, les antécédences, la limitation des ressources, etc. On parle parfois de glissement à gauche local lorsqu'on

avance le début d'une tâche sans remettre en cause l'ordre relatif entre les tâches. On parle aussi de glissement à gauche global lorsqu'on avance le début d'une tâche en modifiant l'ordre relatif entre au moins deux tâches.

Ordonnancement semi-actif : si aucun travail, ne peut avancer sur la ressource où il se trouve, compte tenu des contraintes de gamme et d'antécédence. La longueur de l'ordonnancement correspond au chemin le plus long dans le graphe potentiel tâche.

Aucun glissement à gauche local n'est possible : on peut avancer une tâche sans modifier la séquence sur la ressource.

Ordonnancement actif : si aucune opération d'un travail ne peut débiter son exécution plus tôt sans déplacer au minimum une autre opération. Aucun glissement à gauche, local ou global, n'est possible. Aucune tâche ne peut être commencée plus tôt sans reporter le début d'une autre.

Ordonnancement sans délai : lorsqu'aucune machine n'est laissée inoccupée, ceci alors qu'une file d'attente contient au moins un travail susceptible de débiter son exécution sur cette machine. Lorsqu'une méthode parcourt l'ensemble des ordonnancements sans délai, elle n'est pas capable de trouver la solution optimale, on ne laisse pas une machine inoccupée alors qu'une file contient des tâches. On ne doit pas retarder l'exécution d'une tâche si celle-ci est en attente et si la ressource est disponible.

Ordonnancement préemptif et non préemptif : Selon les problèmes, les tâches peuvent être exécutées sans interruption, c'est-à-dire si on commence l'exécution d'une tâche elle n'est pas interrompue jusqu'à son achèvement. On parle alors d'un ordonnancement préemptif. Par contre, si les tâches sont exécutées par morceaux, l'ordonnancement est appelé non préemptif

### 2.3.5 Typologie des problèmes d'ordonnancements

Une typologie des problèmes d'ordonnancement dans un atelier peut s'opérer selon le nombre et la nature des machines ainsi que l'ordre d'enchaînement des opérations (gamme de fabrication).

Deux grandes familles de problèmes d'ordonnancement se présentent. La première famille regroupe les problèmes pour lesquels chaque job nécessite une seule opération.

La deuxième regroupe ceux dont les jobs nécessitent plusieurs opérations.

### Problèmes à une opération

En se basant sur la configuration des machines, nous distinguons pour la première catégorie :

Problèmes à une machine : les problèmes d'atelier à une machine (single machine problem) consistent à ordonnancer, sur une seule machine, des jobs constitué d'une seule opération.

Problèmes à machines parallèles : les problèmes d'atelier à machines parallèles (parallel machine problem) sont une généralisation des problèmes à une machine. Ce type d'atelier se caractérise par le fait que chaque opération peut être réalisée par n'importe quelle machine, disposée en parallèle, mais n'en nécessite qu'un seul. Le problème d'ordonnancement consiste donc à déterminer l'affectation des opérations aux machines puis le séquençement de ces opérations sur chaque machine.

Dans le dernier cas, il est possible de distinguer trois classes de machines :

1. Machines parallèles identiques (identical parallel machines) : la durée d'exécution des opérations est la même sur toutes les machines.
2. Machines parallèles uniformes (uniform parallel machines) : la durée d'exécution des opérations varie uniformément en fonction de la performance de la machine choisie.
3. Machines parallèles indépendantes ou non liées (unrelated parallel machines) : les durées opératoires dépendent complètement des machines utilisées.

### Problèmes à plus d'une opération

Les problèmes de la deuxième catégorie sont dits problèmes d'atelier du fait de la nécessité du passage de chaque job sur deux ou plusieurs machines dédiées. Suivant le mode de passage des opérations sur les différentes machines, trois types d'ateliers sont distingués à savoir :

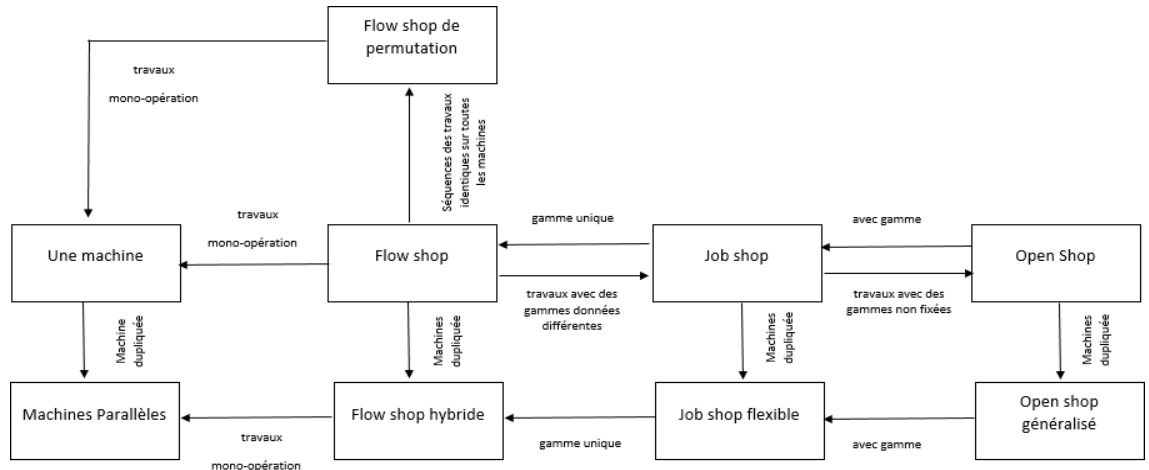
Problèmes Flow-Shop : les ateliers de type Flow-Shop appelés également ateliers à cheminement unique, il s'agit d'un ensemble de  $m$  machines disposées en séries. Toutes

les opérations de tous les jobs passent par les machines dans le même ordre (flot unidirectionnel). Un cas particulier important est celui d'un Flow-Shop de permutation, le Flow-Shop est dit de permutation s'il existe une contrainte selon laquelle la séquence des opérations des différents jobs est la même sur chaque machine.

Problèmes Job-Shop : dans cette classe d'ateliers, appelés aussi ateliers à cheminements multiples, chaque opération passe sur les machines dans un ordre fixé, mais à la différence du Flow-Shop, cet ordre peut être différent pour chaque job (flot multidirectionnel).

Problèmes Open-Shop : dans cette classe d'ateliers, appelés aussi ateliers à cheminement libre, les gammes opératoires des différents jobs ne sont pas fixées a priori contrairement au problème d'atelier Job-Shop. Les opérations d'un même job peuvent donc être exécutées dans un ordre quelconque. Le problème consiste d'une part à déterminer le cheminement de chaque job et d'autre part à ordonnancer les jobs en tenant compte des gammes trouvées.

À partir de ces ateliers de base, de nombreuses extensions ont été proposés afin de traiter des problèmes industriels spécifiques. L'une des principales extensions consiste à proposer plus d'une machine pour la réalisation d'une opération. Le cas de flow shop hybride correspond à une généralisation de l'environnement Flow-Shop standard et de l'environnement de machines parallèles. Autrement dit, au lieu d'avoir  $m$  machines en séries, il existe  $k$  étages en séries où dans chaque étage les machines sont en parallèles. De même pour les ateliers de type Job-Shop et Open-Shop qui donnent respectivement le Job-Shop flexible et l'Open-Shop généralisé. Ces types d'atelier offrent ainsi plus de flexibilité par rapport aux modèles classiques et nécessitent la détermination des affectations adéquates des opérations aux machines en plus de l'établissement des ordres de passages des différentes opérations sur les machines. La figure 2.4 présente d'une manière exhaustive, une typologie de ces problèmes d'ordonnancement.



**Figure 2.4: Typologie des problèmes d'ordonnement**

### 2.3.6 Formalisation des problèmes d'ordonnements

#### Classification et notation

Vu la très grande variété de problèmes d'ordonnement, Graham et al. [26] ont proposé une méthode de classification permettant une distinction facile entre ces problèmes. Cette méthode se base sur une notation à trois champs distincts notée  $\alpha|\beta|\gamma$ .

Le champ  $\alpha$  désigne l'environnement machine. Il se compose généralement de deux sous-champs  $\alpha_1\alpha_2$ . Le premier permet d'indiquer le type de problème étudié (problème à machines parallèles, Flow-Shop, ...) tandis que le second précise le nombre de machines. Le champ  $\beta$  décrit les contraintes liées à l'exécution des tâches. Ce champ peut être vide  $\emptyset$  là où aucune contrainte n'est imposée et peut contenir une concaténation de 1 à  $k$  sous-champs comme présentés dans le Tableau 2. Finalement, le champ  $\gamma$  spécifie le (ou les) critère(s) à optimiser. Il contient dans la plupart des cas un seul champ.

Les différentes notations utilisées pour les valeurs des champs  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  figurent généralement sous forme d'abréviations (cf. tableau 2.1) ayant chacune d'elles un sens particulier. La description de ces abréviations est décrite dans les tableaux 2.2, 2.3 et 2.4 respectivement.

## Chapitre 2: Ordonnancement De Production

Champ	Sous champs	Notation
$\alpha$	$(\alpha_1)$ Type de machine	$\{\phi, 1, P, Q, R, F, J, O, FH, JF, OG\}$
	$(\alpha_2)$ Nombre de machines	$\{\phi, m\}$
$\beta$	$(\beta_1)$ Mode d'exécution des jobs	$\{\phi, pmtn\}$
	$(\beta_2)$ Ressources supplémentaire	$\{\phi, res\}$
	$(\beta_3)$ Relation de précédence	$\{\phi, prec, tree, cahins\}$
	$(\beta_4)$ Dates de disponibilité	$\{\phi, r_i\}$
	$(\beta_5)$ Durées opératoires	$\{\phi, p_i = p\}$
	$(\beta_6)$ Dates d'échéance	$\{\phi, d_i\}$
	$(\beta_7)$ Propriété d'attente	$\{\phi, nwt\}$
$\gamma$	/	$\{C_{Max}, \sum w_i C_i, L_{Max}, T_{Max}, \sum w_i T_i, \sum U_i, \sum w_i U_i\}$

**Tableau 2.1: Classification de Graham**

Notation	Description
I	Problème à une machine
P	Problème à machines parallèle identique
Q	Problème à machines parallèles uniformes
R	Problème à machines parallèles indépendantes
F	Flow-Shop
J	Job-Shop
O	Open-Shop
FH	Flow-Shop hybride
JF	Job-Shop flexible
OG	Open-Shop généralisé

**Tableau 2.2: Interprétation des notations du champ  $\alpha_1$**

Notation	Description
$pmtn$	La préemption des opérations est autorisée
$prec$	Existence des contraintes de précédence entre les opérations
$res$	L'opération nécessite l'emploi d'une ou plusieurs ressources supplémentaires
$nwt$	Les opérations de chaque job doivent se succéder sans attente
$p_i = p$	Les temps d'exécution des tâches sont identiques et égaux à p
$r_i$	Une date de début au plus tôt est associée à chaque job $i$
$d_i$	Une date d'échéance est associée à chaque job $i$

**Tableau 2.3: Interprétation des principales notations possibles de sous-champs du champ**

$\beta$

## Chapitre 2: Ordonnancement De Production

Notation	Expression	Description
$C_{max}$	$\text{Max}_{i \in [1, \dots, n]} C_i$	La durée totale de l'ordonnancement
$L_{max}$	$\text{Max}_{i \in [1, \dots, n]} C_i - d_i$	Le plus grand retard algébrique
$T_{max}$	$\text{Max}_{i \in [1, \dots, n]} \text{Max}\{C_i - d_i, 0\}$	Le plus grand retard vrai
$\sum [w_i] C_i$	$\sum_{i \in [1, \dots, n]} [w_i] C_i$	La somme [pondéré] des dates de fin des tâches
$\sum [w_i] T_i$	$\sum_{i \in [1, \dots, n]} [w_i] \text{max}\{C_i - d_i, 0\}$	La somme [pondéré] des retards
$\sum [w_i] U_i$	$\sum_{i \in [1, \dots, n]} [w_i] \{j_i / C_i > d_i\}$	Le nombre [pondéré] des tâches en retard

**Tableau 2.4: Interprétation des principales notations du champ  $\gamma$**

Bien que les valeurs affectées aux différents champs permettent de modéliser une variété de problèmes d'ordonnancement, multitudes extensions ont été proposées en particulier au niveau des champs  $\beta$  et  $\gamma$  dans le but de supporter d'autres catégories de problèmes particulières.

### Modélisation

La modélisation représente une étape très importante dans la résolution d'un problème. Elle est caractérisée par une écriture simplifiée de toutes les données de problème tout en utilisant un formalisme bien adapté. Principalement, deux types de modélisation existent pour les problèmes d'ordonnancement. La modélisation graphique sous forme de graphe et la modélisation analytique sous forme de programme mathématique.

- **Modélisation graphique**

Cette modélisation apporte une aide incontestable à la manipulation d'un problème. Elle a connu une très importante évolution surtout avec l'apparition des Réseaux de Pétri, qui permettent de traduire plusieurs notions fondamentales ayant un lien avec les problèmes d'ordonnancement (les durées opératoires, les gammes, etc.). Cette méthode de modélisation présente un caractère visuel facilitant la vérification de la cohérence du problème considéré et l'interprétation des solutions, ce qui lui a permis d'être la méthode la plus utilisée dans la littérature. Dans cette modélisation, deux types de graphes sont utilisés, le graphe PERT et le graphe des potentiels.

- **Modélisation analytique**

Un problème d'ordonnancement peut également être modélisé sous une forme analytique. Cette modélisation, couramment utilisée, est souvent sous forme de programme mathématique dont les données, les contraintes et la fonction d'évaluation des

critères sont écrites sous forme d'équations et d'inéquations mathématiques. Cette modélisation permet, non seulement de mettre en évidence l'objectif et les différentes contraintes du problème, mais également de le résoudre.

### Représentation des solutions

Afin de visualiser une solution d'un problème d'ordonnancement, nous utilisons couramment une représentation graphique appelée diagramme de Gantt. Ce diagramme constitue un formalisme graphique qui a été mis au point par Henry Gantt en 1910.

Dans le cas d'un problème d'atelier, le diagramme est formé de deux axes orthogonaux et peut avoir deux représentations :

1. La représentation « Jobs »
2. La représentation « Machines »

Pour la représentation « Jobs », l'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical représente les jobs. Pour chaque job, nous dessinons des rectangles représentant l'ensemble des machines utilisées dans le temps pour la réalisation du job.

Pour la représentation « Machines », l'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical représente les machines. Pour chaque machine, nous représentons l'ensemble des opérations effectuées dans le temps par des barres ayant des longueurs proportionnelles à leurs durées opératoires. Cette représentation permet de visualiser l'occupation des machines, l'enchaînement des opérations sur celles-ci, les dates de début et de fin de chaque opération ainsi que le temps d'inactivité des machines.

À titre d'illustration, une solution réalisable du problème  $F3|pmtn|C_{max}$  avec les données fournies dans le tableau 2.5 est donnée par la figure 2.5. Nous utilisons la représentation (b), pour présenter notre solution dans ce qui suit.

$J_i$	$p_{i1}$	$p_{i2}$	$p_{i3}$
$J_1$	2	1	3
$J_2$	3	5	2

$J_3$	4	2	1
-------	---	---	---

Tableau 2.5: Temps opératoires pour 3 jobs et 3 machines

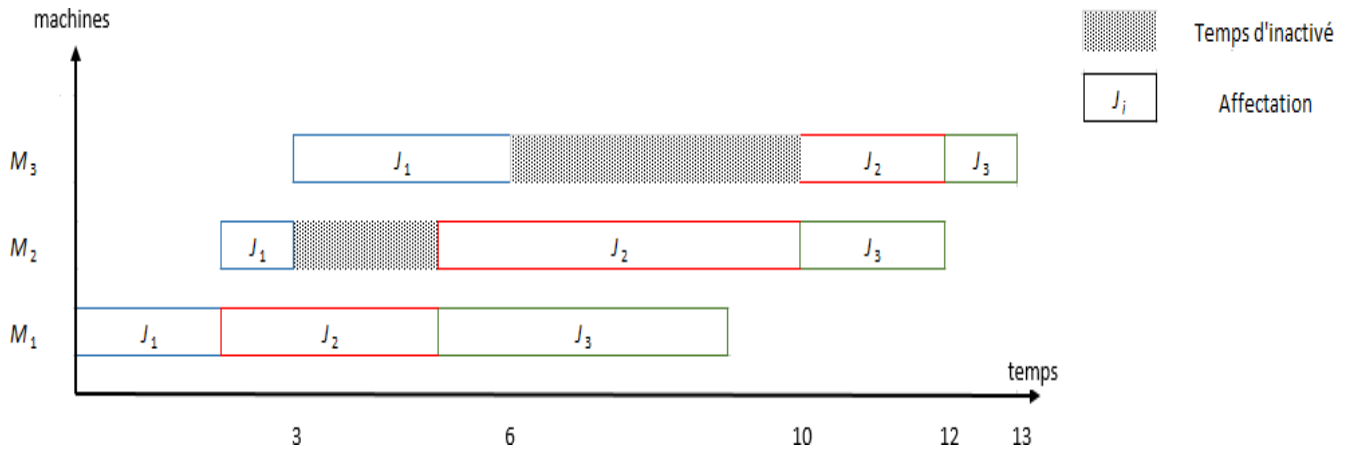


Figure 2.5: Diagramme de Gantt d'une solution du problème  $F3|pmtn|Cmax$

## 2.4 La théorie de la complexité

Les problèmes d'optimisation sont des problèmes dont la résolution consiste à trouver parmi un ensemble de solutions celle qui répond le mieux à certains critères décrits sous forme d'une fonction objectif. Lorsque le domaine de solutions est discret, on parle alors de problèmes d'optimisation combinatoire. Les problèmes d'ordonnancement font partie des problèmes d'optimisation combinatoire.

La théorie de la complexité a pour but d'analyser les coûts de résolution, notamment en termes de temps de calcul, des problèmes d'optimisation combinatoire.

La définition de la complexité d'un problème découle de la définition de la complexité des algorithmes. Informellement, la complexité d'un problème peut être définie comme la complexité du meilleur algorithme permettant sa résolution.

### 2.4.1 Complexité algorithmique

La complexité algorithmique est un concept fondamental qui permet de mesurer les

performances d'un algorithme. Ces performances sont évaluées sur la base du temps alloué pour l'exécution de l'algorithme ou encore par rapport à l'espace mémoire requis pour résoudre le problème. Généralement, le temps d'exécution est le facteur dominant pour déterminer l'efficacité d'un algorithme, pour cela, on se concentre principalement sur ce facteur.

La complexité temporelle d'un algorithme représente le nombre maximum d'opérations élémentaires effectuées pour résoudre un problème donné. Cette complexité se base essentiellement sur la mesure d'un ordre de grandeur qui est évalué en fonction de la taille du problème  $n$ . La notation  $O$  est utilisée pour représenter cet ordre de grandeur. Par exemple, pour un algorithme donné, si la solution est donnée en environ  $n$  opérations, on dit que l'algorithme a une complexité en  $O(n)$ .

### Definition 1

Un algorithme est dit polynomiale si pour tout  $n$ , l'algorithme s'exécute en moins de  $n^k$  opérations élémentaires ( $k$  étant une constante).

En d'autres termes, un algorithme polynomial est un algorithme dont la complexité temporelle est bornée par un polynôme  $p$  de  $n$ ,  $O(p(n))$  : par exemple  $O(n^k)$  avec  $k$  une constante.

### Definition 2

Un algorithme est dit non-polynomial si le nombre d'opérations  $n$ 'est pas borné par un polynôme de  $n$ .

En d'autres termes, si le nombre d'opérations est borné par une forme exponentielle de la taille de problème alors l'algorithme est dit non-polynomial ou exponentiel : par exemple  $O(a^n)$  avec  $a > 1$  une constante.

### 2.4.2 Complexité problématique

La complexité problématique dépend de la difficulté du problème à résoudre et du nombre d'opérations élémentaires qu'un algorithme peut effectuer pour trouver l'optimum en fonction de la taille du problème.

La théorie de complexité de problème d'optimisation se limite à la seule étude de

problème de décision. Celui-ci, aussi appelé problème de reconnaissance, est un problème dont la résolution se limite à la réponse par « oui » ou par « non » à la question de savoir s'il existe une solution à un problème donné.

Pour chaque problème d'optimisation, on peut associer un problème de décision défini par la question suivante : « Existe-t-il une solution telle que son évaluation est majorée par une constante fixée ? ». Ceci est pour un problème d'optimisation, dont la fonction objectif est la minimisation (resp. Maximisation). Par exemple, dans un problème de type Flow-Shop  $F_m||C_{\max}$  ayant comme fonction objectif la minimisation du makespan, le problème de décision associé est : « Existe-t-il un ordonnancement pour un Flow-Shop où le makespan est inférieur à une certaine valeur  $z$  ».

Alors si la réponse a la question existe et est obtenue grâce à un algorithme polynomial alors il existera un algorithme polynomial résolvant le problème d'optimisation associé. Cette propriété nous permet de classer les problèmes d'optimisation grâce à leurs problèmes de décision. Ces problèmes peuvent être classés en deux classes principales : la classe P et la classe NP.

— La classe P (Polynomiale) : les problèmes appartenant à la classe P sont ceux dont le problème de décision correspondant peut être résolu à l'optimum, à l'aide d'un algorithme en temps polynomial. C'est en quelque sorte la classe des problèmes dits « facile ».

— La classe NP (Non-deterministic Polynomial) : cette classe a un nom trompeur, NP ne correspond pas à Non Polynomial, mais à Polynomial Non-déterministe ou en anglais « Non-deterministic Polynomial ». Cette classe est une extension de la classe P, elle représente la classe des problèmes de décision pour lesquels un algorithme non-déterministe peut vérifier en temps polynomial la validité d'une solution du problème traité.

La classe NP contient donc des problèmes plus « difficiles » que la classe P. Mais de même dans la classe NP, on peut trouver des problèmes encore plus difficiles. Pour cette raison, la classe des problèmes NP-complet a été créée. Pour définir la classe NP-Complet, il est intéressant de définir la notion de réduction polynomiale.

— La classe NP-complet : cette classe réunit l'ensemble des problèmes de décision

qui n'ont pas d'algorithmes polynomiaux connus pour leurs résolutions. En effet, un problème de décision  $P$  est dit NP-complet, si :

- Il appartient à la classe NP
- Tout problème  $P'$  de la classe NP peut se réduire polynomialement à lui.  $\forall P' \in \text{NP}, P' \leq P$

Certains auteurs font une distinction entre les problèmes faiblement NP-complet et les problèmes fortement NP-complet. Un problème est dit NP-complet au sens faible si on peut construire des algorithmes très efficaces appelés les algorithmes « pseudo-polynomiaux ». Dans le cas contraire, il est dit NP-complet au sens fort.

### Définition

Un problème d'optimisation est dit NP-difficile au sens fort (resp. NP-difficile au sens faible) si le problème de décision qui lui correspond est NP-complet au sens fort (resp. NP-complet au sens faible).

Les différentes classes présentées précédemment ne sont que les principales classes dans la théorie de la complexité.

### 2.4.3 Hiérarchie de complexité pour les problèmes d'ordonnement

La théorie de la complexité représente un outil important dans la théorie d'ordonnement puis qu'elle permet d'établir une classification des problèmes d'ordonnement en plusieurs classes de difficulté et donne une orientation sur la méthode de résolution de ces problèmes.

On utilisant la réduction polynomiale, une hiérarchie de complexité (aussi nommé l'arbre de réduction) de certains problèmes d'ordonnement peut être établie en fonction de l'environnement machine, les contraintes ainsi que les critères. La figure 2.6 présente une hiérarchie de la complexité en fonction de l'environnement machine. Cet arbre s'interprète de la manière suivante : pour des contraintes données et pour un critère donné, si un problème est NP-difficile, tous ses successeurs dans l'arbre le sont également. La même hiérarchie de complexité peut être tracée pour les contraintes et les critères. Figure 2.7 présente la hiérarchie de complexité en fonction des contraintes alors

que la figure 2.8 illustre la hiérarchie de complexité en fonction des critères à optimiser. Ces deux arbres ont une interprétation similaire à celle d'arbre d'environnement machine.

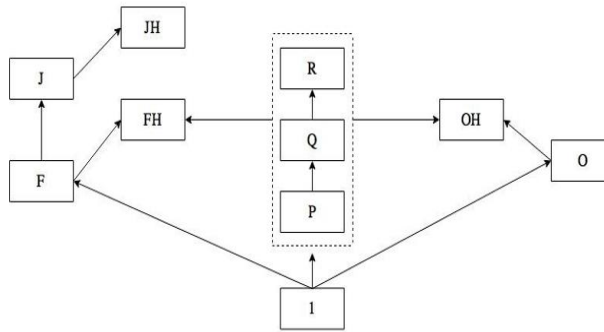


Figure 2.6 : Hiérarchie de complexité des problèmes d'ordonnement en fonction de l'environnement machine

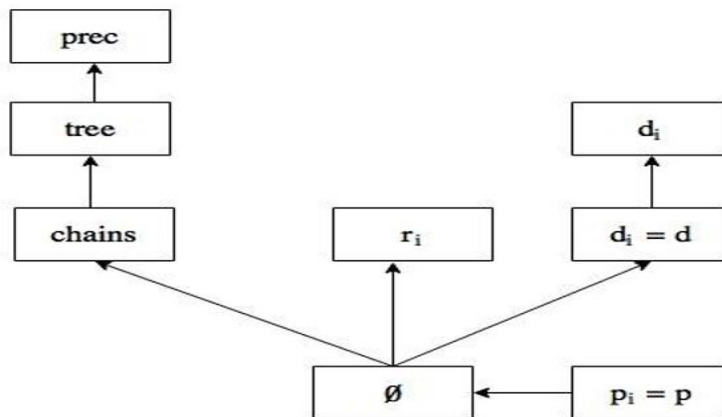


Figure 2.7 : Hiérarchie de complexité des problèmes d'ordonnement en fonction des contraintes [17]

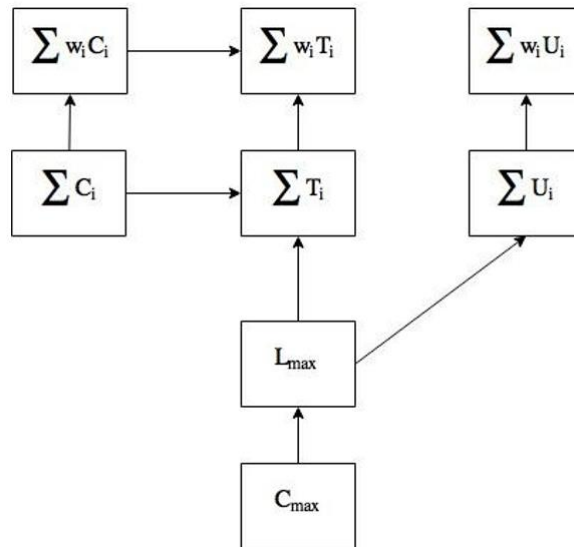


Figure 2.8: Hiérarchie de complexité des problèmes d'ordonnement en fonction des critères [10]

En se basant sur les hiérarchies de complexité présentées par la figure 2.6 et 2.8, ainsi que les résultats de la littérature, la classe de complexité des problèmes d'ordonnement monocritère sans contraintes sont représenté dans le Tableau 1.6 où P représente la classe P, NP : classe NP difficile au sens fort et NP\* : classe NP-difficile au sens faible.

	Critères	$C_{max}$	$L_{max}$	$\sum C_i$	$\sum w_i C_i$	$\sum T_i$	$\sum w_i T_i$	$\sum U_i$	$\sum w_i U_i$	
Problèmes	Une seule machine	P	P	P	P	NP*	NP	P	NP*	
	Machines parallèles	P	NP	NP	P	NP	NP	NP	NP	NP
		Q	NP	NP	P	NP	NP	NP	NP	NP
		R	NP	NP	P	NP	NP	NP	NP	NP
	Flow-Shop	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
	Job-Shop	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
	Open-Shop	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
	Flow-Shop hybride	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
	Job-Shop flexible	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
	Open-Shop généralisé	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	

Tableau 2.6 : Classe de complexité des problèmes d'ordonnement monocritère

### 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons positionné l'ordonnancement dans le système de production, où l'accent est mis sur son importance cruciale dans le processus de production. Nous avons présenté les différentes notations, définitions, classification des problèmes d'ordonnancement, ainsi que les types et les représentations des ordonnancements. Nous avons exposé à la fin de ce chapitre la complexité des problèmes d'optimisation et nous avons mentionné que l'étude de complexité des problèmes d'ordonnancement conduit au choix de leurs méthodes de résolution. Donc, il est essentiel d'identifier la classe de complexité de ces problèmes. Si le problème d'ordonnancement appartient à la classe P donc il dispose d'un algorithme polynomial spécifique qui permette de le résoudre. Sinon, si le problème appartient à la classe NP-difficile alors pour l'appréhender, différentes méthodes de résolution sont proposées dans la littérature. Dans le chapitre suivant, nous présentons le problème d'ordonnancement d'atelier Flow-Shop et Flow-Shop hybride.

**CHAPITRE 3: FLOW-SHOP ET FLOW-SHOP  
HYBRIDE**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons de manière plus détaillée les systèmes de production de type Flow-Shop et Flow-Shop hybride qui font l'objet de notre étude. Nous présentons un état de l'art des approches développées pour le Flow-Shop classique. Enfin, nous présentons un état de l'art des approches développées pour le Flow-Shop hybride.

### 3.2 Flow-Shop Classique

Dans le problème d'ordonnancement de systèmes de type Flow-Shop (F), un ensemble de  $N$  jobs,  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_N\}$ , doit être traité sur un ensemble de  $M$  machines,  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_M\}$ . Tous les jobs passent sur toutes les machines dans le même ordre. Ils sont donc composés de  $M$  opérations,  $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iM}\}$ . L'opération  $O_{ik}$  a besoin d'un temps d'exécution  $P_{ik}$  sur la machine  $M_k$ . Chaque machine ne peut effectuer qu'une seule opération à la fois et chaque job ne peut avoir qu'une seule opération en cours de réalisation simultanément. La capacité de stockage inter-machines est définie et la préemption d'opérations n'est pas autorisée.

La Figure 3.1 illustre un exemple de système de production de type Flow-Shop classique à  $N$  jobs et  $M$  machines.

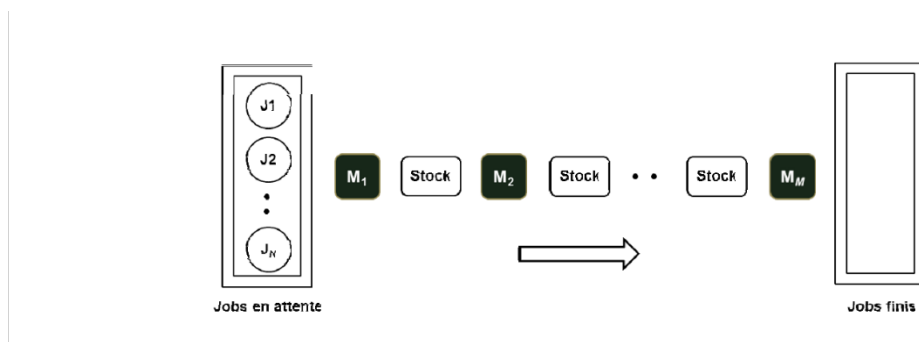


Figure 3.1: Flow-Shop classique [27]

La résolution du problème consiste à déterminer l'ordre de passage des jobs sur l'ensemble des machines ainsi que les instants de début et de fin des opérations des jobs

afin de réduire au minimum le temps total d'exécution de tous les jobs, aussi appelé makespan et noté  $C_{max}$ .

### **3.4 Etat de l'art :**

Dans cette partie, nous établissons un état de l'art des travaux concernant les problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop classique. Nous présentons tout d'abord les résultats de complexité et ensuite Nous donnons les résultats des travaux utilisant des méthodes de résolution exacte. Enfin, nous présentons quelques travaux présentés dans la littérature qui concernent la résolution de ces problèmes par des méthodes approchées.

#### **3.4.1 Complexité**

Le premier article traitant le problème d'ordonnancement de type Flow-Shop classique a été publié il y a une cinquantaine d'années Johnson, dans lequel l'auteur montre que la minimisation du makespan du problème d'un Flow-Shop classique à deux machines  $F2||C_{max}$  est polynomiale. Dans le même article, Johnson démontre que pour les problèmes de Flow-Shop classique à trois machines  $F3||C_{max}$ , si les temps opératoires sur la deuxième machine sont uniformément inférieurs à ceux de la première ou la troisième machine, le problème peut être résolu en temps polynomial. Par contre, si cette condition n'est pas vérifiée, les auteurs dans [29] montrent que le problème  $F3||C_{max}$  est NP-Difficile au sens fort.

De nombreux auteurs se sont intéressés à d'autres aspects de ce problème. Par exemple, pour le cas où la préemption est autorisée, les auteurs Gonzalez et Sahni ont montré que le problème de type Flow-Shop préemptif à deux machines  $F2|pmtn|C_{max}$  peut être résolu par l'algorithme de Johnson et est donc polynomial, tandis qu'il devient NP-Difficile au sens fort pour le problème à trois machines  $F3|pmtn|C_{max}$ . Nous pouvons citer aussi le cas du problème avec les dates de disponibilité pour les jobs  $F2|r_i|C_{max}$ , qui est un problème NP-Difficile au sens fort Lenstra. Le cas préemptif de ce dernier problème  $F2|r_i,pmtn|C_{max}$  est aussi NP-Difficile au sens fort. Parmi les travaux les plus récents, nous pouvons citer ceux de (Baptiste et Timkovsky) et (Averbakha et al) qui ont montré que les problèmes  $F2|prec,r_j,p_{ij}=1|\sum C_j$  et  $FM|p_{ij}=1,intree|\sum C_j$ , respectivement, peuvent être résolus polynomialement.

#### 3.4.2 Méthodes exactes

Parmi les méthodes exactes utilisées pour la résolution des problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop classique, on trouve la procédure par Séparation et Evaluation (Branch and Bound). Elle a été appliquée sur le problème de type Flow-Shop à  $M$  machines  $FM||C_{max}$  par plusieurs auteurs dont on peut citer : Lomnicki, Gupta. Dans [30], l'auteur a également proposé une procédure Branch and Bound avec laquelle il est possible de résoudre des instances jusqu'à 15 jobs et 4 machines. Parmi les procédures Branch and Bound les plus récentes, on peut citer celle proposée dans Carlier et Rebaï qui peut résoudre des instances jusqu'à 50 jobs et 10 machines.

En comparant le nombre de variables entières binaires requises dans trois modèles linéaires en nombre entiers pour différents problèmes d'ordonnancement, Pan conclue que pour les problèmes de Flow-Shop de permutation, le modèle de Manne est la meilleure formulation programmée, le modèle de Wanger est classé deuxième et le modèle de Wilson arrive derrière le modèle de Wanger.

Une autre étude a été menée dans Tseng et al [31] pour comparer quatre modèles mathématiques : Wagner, Wilson, Manne et Liao et You . Dans cette étude, les auteurs utilisent un critère différent de celui utilisé dans Pan. En effet, ils comparent le temps de calcul que nécessite chaque modèle pour trouver la solution optimale, et obtiennent un classement différent :

1. Le modèle de Wagner est la meilleure formulation PLNE.
2. Le modèle de Wilson est la deuxième meilleure formulation PLNE.
3. Le modèle Manne traîne derrière la formulation de Liao-You.

#### 3.4.3 Méthodes approchées

Parmi les méthodes constructives qui ont été proposées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop classique à  $M$  machines  $FM||C_{max}$ , nous pouvons citer celles de Campbell, Rock et Schmidt qui proposent des algorithmes basés sur une adaptation de l'algorithme de Johnson. L'heuristique NEH Nawaz [32] est une des heuristiques les plus connues pour résoudre ce genre de problèmes. Elle est non seulement la plus efficace Ruiz et Marotto [33], mais aussi très simple à programmer.

Pour ce qui concerne la résolution des problèmes  $FM||C_{max}$  par les méthodes amélioratives, les auteurs dans Taillard [34] proposent une recherche taboue et la comparent aux meilleures heuristiques existantes. Les auteurs de (Osman et Potts) et (Ishibuchi et Misaki) se sont intéressés à la méthode de recuit simulé pour résoudre ces problèmes. Une autre méthode d'amélioration basée sur un Branch and Bound tronqué a été proposée par Haouari et Ladhari. Elle a permis de résoudre efficacement des problèmes de grande taille (jusqu'à 200 jobs et 10 machines). Enfin, pour les travaux qui ont proposé des algorithmes génétiques pour résoudre les problèmes  $FM||C_{max}$ , nous citons (Iyer et Saxena), (Siarry et Michalewicz) et Zobolas. Dans ce dernier article, des résultats ont été obtenus pour des problèmes de très grande taille (jusqu'à 200 jobs et 20 machines).

### 3.5 Flow-Shop hybride

Afin d'être toujours plus réactives et productives, les entreprises ont cherché à augmenter la flexibilité de leurs systèmes de production. Pour atteindre ce but, il est possible de multiplier le nombre des machines qui peuvent réaliser une même opération. Ces machines, considérées comme identiques dans le cadre de cette thèse, sont regroupées en étage. Le modèle résultant est connu dans la littérature sous le nom de Flow-Shop hybride (FH).

Le Flow-Shop hybride est donc une généralisation du Flow-Shop classique au cas où plusieurs machines sont disponibles sur un ou plusieurs étages pour exécuter les différentes tâches du Flow-Shop. Ces problèmes présentent alors une difficulté supplémentaire par rapport aux problèmes sans flexibilité des ressources. En effet, la machine qui sera utilisée pour exécuter une opération n'est pas connue d'avance, mais doit être sélectionnée parmi un ensemble donné pour construire une solution au problème.

Dans un problème d'ordonnancement de type Flow-Shop hybride, un ensemble de  $N$  jobs,  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_N\}$ , doit être traité dans un atelier de production composé de  $K$  étages,  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_K\}$ . Chaque étage  $E_k$  contient  $M_k$  machines parallèles identiques, avec ( $k=1,2,\dots,K$ ). Tous les jobs exigent le même ordre des opérations,  $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iK}\}$ , qui doivent être exécutés selon le même processus de fabrication. L'opération  $O_{ik}$  a besoin d'un temps d'exécution  $P_{ik}$  sur l'étage  $E_k \hat{=} E$ . Une machine ne peut appartenir qu'à un seul étage et ne peut effectuer qu'une seule opération à la fois. Chaque job ne

peut avoir qu'une seule opération en cours de réalisation simultanément et doit être traité par une seule machine de l'étage  $E_k$ , sans interruption.

Un exemple de système de production de type Flow-Shop hybride à  $N$  jobs,  $K$  étages et  $M_k$  machines par étage, est présenté sur la Figure 3.2.

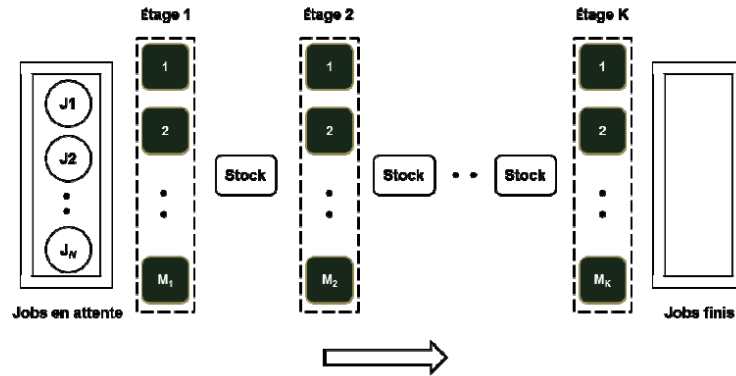


Figure 3.2: Flow-Shop Hybride [27]

La résolution du problème consiste à trouver un ordonnancement faisable minimisant le makespan en déterminant l'ordre de passage des jobs sur l'ensemble des machines ainsi que les dates de début et de fin des opérations sur chaque machine.

### 3.6 Etat de l'art :

Dans cette partie, nous établissons un état de l'art des travaux concernant les problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop hybride (FH), et portant sur la minimisation du makespan dans ces systèmes de production.

De la même façon que celle dont nous avons présenté l'état de l'art des problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop classique, nous optons pour la même démarche pour le cas du Flow-Shop hybride. Nous présentons d'abord les résultats de complexité, puis les travaux utilisant des méthodes de résolution exacte et enfin les travaux qui concernent la résolution par des méthodes approchées.

Parmi les travaux qui nous ont aidés à établir un état de l'art des problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop hybride, nous pouvons citer ceux de (Linn et Zhang), (Vignier *et al*) et (Ruiz et Vázquez-Rodríguez).

### 3.6.1 Complexité

Dans Gupta [35], l'auteur s'est intéressé aux problèmes de type Flow-Shop hybride à deux étages ( $K=2$ ) avec le makespan comme critère d'optimisation. Il a montré dans ce travail que le problème avec plus d'une machine sur au moins un étage  $FH2(\max(M_1, M_2) > 1) || C_{max}$  est NP-Difficile. Dans Hoogeveen [36], les auteurs montrent que le cas préemptif du même problème est aussi NP-Difficile. Par conséquent les problèmes de type Flow-Shop hybride au cas général (plus de deux étages) sont NP-Difficiles.

### 3.6.2 Méthodes exactes

Pour résoudre le problème  $FH2(M_1=2, M_2=1) || C_{max}$ , un Branch and Bound a été testé sur des exemples de moins de 10 jobs à cause des temps de calcul élevés dans Arthanary et Ramaswamy. Dans Allaoui et Artiba, les auteurs ont proposé un Branch and Bound pour le problème  $FH2(M_1=1, M_2=m) || C_{max}$ . Toujours avec les problèmes FH à deux étages, un Branch and Bound basé sur une méthode exacte pour résoudre un problème d'ordonnancement pour machines identiques parallèles a été proposé dans Haouari [37] pour résoudre le problème  $FH2(M_1=m_1, M_2=m_2) || C_{max}$ .

Pour résoudre les problèmes à  $K$  étages  $FHK || C_{max}$ , une méthode exacte basée sur la modélisation du problème par un programme linéaire mixte Hunsucker et Brah, et un Branch and Bound pour les problèmes de petite taille Brah et Hunsucker ont été proposés.

Dans Perregaard [38], l'auteur propose un nouveau schéma de branchement qui se rapproche de celui proposé dans Brah et Hunsucker, du fait que les séquences de tâches sur les machines ne sont pas construites chronologiquement.

Dans Carlier et Néron [39], les auteurs proposent une procédure de Branch and Bound non classique, dont le schéma de séparation non chronologique est original et permet de traiter des problèmes de taille importante (jusqu'à 150 tâches).

### 3.6.3 Méthodes approchées

Pour le problème de Flow-Shop hybride à deux étages avec  $m$  machines identiques sur le premier étage et une seule machine sur le deuxième étage  $FH2(M_1=m, M_2=1) || C_{max}$ , une heuristique basée sur la règle de Johnson a été proposée Gupta [49]. Pour le problème

inverse  $FH2(M_1=1, M_2=m)||C_{max}$ , des bornes supérieure et inférieure utilisées dans une heuristique basée sur une méthode de Branch and Bound a été proposée par Gupta et Tunc. Cette heuristique donne de bonnes solutions quand le nombre de jobs est inférieur à 9.

Pour le problème à deux étages, où le nombre de machines parallèles identiques sur chaque étage est le même  $FH2(M_1=M_2=m)||C_{max}$ , des méthodes heuristiques ont été proposées pour le cas non-préemptif Langston et (Shen et Chen), ainsi que dans le cas préemptif (Buten et Shen).

Pour les problèmes avec plusieurs machines sur les deux étages  $FH2(M_1=m_1, M_2=m_2)||C_{max}$ , une heuristique et des bornes inférieures ont été proposées dans Lee et Vairaktarakis [40]. Deux heuristiques plus performantes que celle-ci, basées sur le recuit simulé et la recherche tabou ont été proposées dans Haouari et M'Hallah [41] pour ce même problème.

Dans Riane [42], les auteurs proposent deux heuristiques pour résoudre un problème réel à trois étages  $FH3(M_1=1, M_2=2, M_3=1)||C_{max}$ . L'une repose sur la programmation linéaire et l'autre est basée sur le Branch and Bound. Une expérimentation étendue a prouvé les excellentes performances des heuristiques développées.

Pour le problème de Flow-Shop hybride à  $K$  étages  $FHK||C_{max}$ , des heuristiques ont été proposées par Nowicki et Smutnicki qui sont basées sur la recherche tabou avec un voisinage basée sur la notion de blocs proposée par Grabowski. Une étude comparative de six heuristiques pour la résolution de ce problème a été proposée dans Hunsucker et Shah. Parmi les travaux qui ont proposé le recuit simulé comme méthodes approchées pour la résolution des problèmes  $FHK||C_{max}$ , nous pouvons citer Gourgand [43] et Jin [44]. Quant à l'algorithme génétique, il a été utilisé dans les travaux de Ruiz [45] et Kahraman [46]

Dans Portmann [47], les auteurs ont proposé une amélioration du Branch and Bound développé dans Brah et Hunsucker. Différentes heuristiques sont proposées pour calculer des bornes inférieures initiales. Ces dernières sont améliorées par un algorithme génétique au cours de la résolution. Une étude expérimentale montre que leur approche permet de résoudre optimalement des problèmes de petite taille ( $N = 10, 15$  et  $K = 2, 3, 5$ ).

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé la définition des systèmes de production de type Flow- Shop et Flow-Shop hybride en premier lieu. Puis, nous nous intéressons à l'état de l'art des systèmes de type Flow-Shop et Flow-Shop hybride. Dans ce qui suit nous proposons les outils nécessaires à la mise en œuvre de l'approche utilisée.

## **CHAPITRE 4 : LA MÉTHODE DE RESOLUTION**

### 4.1 Introduction

Le présent chapitre est dédié à la description de l'approche d'optimisation à base de la simulation. Nous allons passer à la définition et l'implémentation de notre méthode basée sur le couplage de l'algorithme génétique et particulièrement NSGAI (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) et la simulation.

### 4.2 couplage simulation et optimisation pour la conception des chaînes logistiques

Les outils de simulation très performants dans la prise de décisions opérationnelles à l'échelle de l'atelier ou de l'usine sont des outils puissants pour combler les éventuelles défaillances (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 [48], 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.

Pour des applications industrielles, le module d'optimisation s'appuie principalement sur des algorithmes de recherche tels que les algorithmes génétiques.

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 monocritère à une réelle optimisation multicritères.

### 4.3 Méthode d'optimisation

Notre problématique est d'optimiser la performance en satisfaisant les clients à moindre coût. Nous cherchons à développer une solution à ce problème à travers la satisfaction des contraintes sur les dates d'arrivée des composants et les dates de livraison des produits finis. Chaque centre de décision a un problème d'ordonnancement juste à temps à gérer de manière indépendante, les dates de sortie ont été négociées entre les centres de décision lors de la première étape avec les fournisseurs externes, et les dates d'échéance entre les clients externes et le centre d'assemblage ont toutes été contrôlées par les décisions prises au niveau le niveau de planification.

### 4.4 L'objectif de la méthode

Notre travail vise à créer un cadre d'optimisation qui combine les méthodes mathématiques (pour l'optimisation) et la simulation (pour l'évaluation), afin d'améliorer l'ensemble de 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 évalués 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 utilisons l'approche de simulation à base d'optimisation.

### 4.5 L'architecture de la méthode

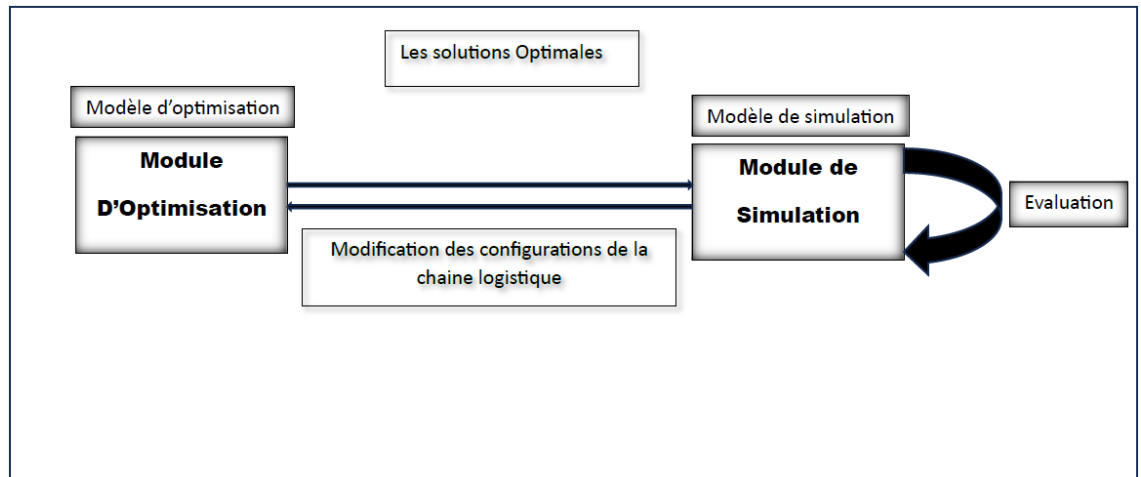


Figure 4.1: Conception architecturale

L'architecture globale est divisée en deux modèles (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. La raison pour laquelle on a utilisé 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.

Et afin de produire un modèle optimal d'une chaîne logistique notre système d'optimisation à base de simulation utilise une configuration initiale de la chaîne logistique, qui contient la table du temps de traitement, puis le module d'optimisation va générer une solution d'ordonnancement optimal par l'application de l'algorithme génétique plus précisément le NSGAI, qui explore les solutions candidates intéressantes 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 la valeur d'une fonction objective, qui serait en fait la somme des retards, si on a du retard le module de simulation va modifier la configuration de la chaîne logistique, ainsi il va abaisser tous les temps de traitement des tâches et cela mène à l'augmentation du coût et de la pénalité). Dans la deuxième éventualité, lorsqu'on n'a pas de retard il

ferait l'inverse, il va augmenter tous les temps de traitement des tâches et réduire les coûts sans la moindre pénalité. Ce processus continuera jusqu'à atteindre un nombre maximum fixe d'itérations. Enfin on sera appelé à choisir parmi ces modèles le meilleur qui minimise la somme de  $C_{max}$  et du coût sans le moindre retard, ainsi on aura atteint une solution optimale déduite d'une méthode d'optimisation basée sur la simulation.

La combinaison entre la simulation et l'optimisation n'est pas une pratique nouvelle dans l'étude des systèmes complexes et plus particulièrement des chaînes logistiques. Néanmoins, la spécificité de l'approche utilisée dans ce travail est, les caractéristiques de cette approche sont triples :

- La nature évolutionnaire des AGs permet l'identification des directions de recherche de manière intelligente et efficace ;
- La simulation permet une évaluation fidèle des décisions stratégiques tactiques et opérationnelles, avec la prise en compte des incertitudes liées aux différentes activités de la chaîne
- L'optimisation multicritères permet au décideur de manipuler simultanément plusieurs indicateurs de performances de natures différentes, financiers comme les coûts, les délais, et non financier comme le niveau de service du client.

### 4.6 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. Matlab est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques, est utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox (« boîte à outils »).

**NSGA-II** est l'un des GA les plus utilisés pour l'optimisation multi-objectifs. Cet algorithme a été développé par Deb et al. Comme un algorithme génétique multi-objectif rapide et efficace. Trouver un ensemble de solutions non dominées basées sur la relation de dominance Pareto est le but de cette approche. NSGA-II met en œuvre l'élitisme et la sélection de tournois surpeuplés. L'élitisme est un mécanisme qui garantit que les individus les mieux adaptés à une population sont retenus et que l'on peut ainsi être assuré que la bonne forme physique obtenue ne se perdra pas dans les générations suivantes. La sélection de tournois bondés est une méthode de sélection basée sur un tournoi dans laquelle un groupe d'individus participe à un tournoi et le niveau de forme physique de chaque personne, un mélange de rang et de distance de foule, est utilisé pour choisir le gagnant.

Le concept principal du NSGA-II est la création d'une population initiale, la sélection des parents, la création d'enfants et la recherche de solutions non dominées. Au début, une population initiale  $P$  (taille  $N$ ) est créée aléatoirement. La population est triée en fonction de la non-dominance. La population de progéniture  $Q$  (taille  $N$ ) est créée en utilisant la population parentale (taille  $N$ ) par les opérateurs génétiques habituels de sélection, de croisement et de mutation. La population enfant créée est combinée avec la population parent pour former une population combinée  $R$  de taille  $2N$ . Ensuite, trouvez les meilleures solutions entre la population actuelle et la population descendante par rapport à la population actuelle de l'itération suivante (toutes les solutions sont classées dans différents ensembles non dominés et une distance d'encombrement est calculée pour classer les solutions dans le même ensemble). Ce processus est répété jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit satisfait. Le code source de NSGA-II est disponible gratuitement à des fins de recherche sur le site Web de KanGal (Kanpur Genetic Algorithms Laboratory) et sa procédure de mise en œuvre détaillée peut être trouvée dans (Deb K, (2000)).

### **Pseudo-code de NSGII [49]**

<pre> NSGA (N,g) P0=initialisation-de-la-population(N) Evaluation des objectifs Tri-non-dominance(P0) Générer une population d'enfants Q0   Sélection par tournoi binaire   mutation et recombinaison Pour t=1 jusqu'à g   Rt=Pt ∪ Qt   { F1,F2,..Fk }=tri-non-dominance(Rt)   Pt+1= ∅   i=1   Tant que N- Pt + 1  ≥  Fi      Pt+1=Pt+1∪ Fi     i=i+1   Fin tant que   Si N- Pt + 1  &lt;  Fi &amp; N -  Pt + 1  ≠ 0     assignement-distance-crowding(Fi)     tirer(Fi,&lt;n)     Pt+1=Pt+1∪ Fi [1:N- Pt + 1 ]   Sinon     Qt+1=créer-nouv-pop(Pt+1) t+1 </pre>	<pre> Combiner les 2 populations Trier Rt Initialiser Pt+1 Initialiser le compteur Tant que Pt+1 est incomplète inclure les fronts Fi dans Pt+1 incrémenter i de 1  Si dernier front Fi est trop large attribuer les distances opérateur de crowding inclure une partie de Fi ∪ Pt+1 si Pt+1 est complète créer une nouvelle population Prochaine génération </pre>
--	---

Explication : D'abord, une population de parents (P0) de taille (N) est générée, elle est tirée à base de non dominance, chaque solution se fait attribuer une fitness factice égale à son niveau de non-dominance (veut dire non-dominée donc meilleure fitness). Après l'application des opérations génétiques sur (P0), une population enfant Q0 de taille N est créée. Après, cette première procédure, une boucle commence. Tant que le critère d'arrêt n'est pas vérifié, les populations, parents et enfants sont mélangées pour produire une population (Rt = Pt ∪ Qt), puis tirées à base de non dominance pour identifier plusieurs fronts F1, F2, etc. Les meilleurs individus vont se retrouver dans le ou les premiers fronts. Une nouvelle population parente (Pt+1) est formée en ajoutant les fronts au complet (premier front F1, second front F2, etc.) tant que ceux-ci ne dépassent pas N. Si le nombre d'individus présents dans (Pt+1) est inférieur à (N), une procédure de crowding est appliquée sur le premier front suivant, (Fi), non inclus dans (Pt+1) pour insérer les (N - |Pt+1 |) meilleurs individus de (Fi) qui manquent dans la population (Pt+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 (Pt+1) sont identifiés, une nouvelle population enfant (Qt+1) est créée par sélection, croisement et mutation [49][50].

**Option de NGPM** : NGPM est l'abréviation de « A NSGA-II program in Matlab », qui est l'implémentation de NSGA-II dans Matlab.

Ce programme est écrit pour un problème d'optimisation par objets finis, le "croisement intermédiaire" et la "mutation gaussienne" sont adéquats pour nous utilisation. Ainsi, nous n'implantons pas d'autres opérateurs génétiques dans NGPM. Le codage réel/entier, la sélection de tournois binaire. L'opérateur de mutation Gaussien et l'opérateur de croisement intermédiaire fonctionnent bien dans ces outils.

### 4.7 Les résultats expérimentaux

Pour expérimenter notre prototype développé, nous avons utilisé le modèle simple de la chaîne d'approvisionnement. Cette configuration stratégique contient 7 jobs spécifiés avec leurs opérations, 9 ressources différentes au sein d'un même centre de production. Nous avons formulé un modèle d'optimisation tactique pour décider des ressources à utiliser, des matières premières et de la conception des tâches. Les commandes clients permettent de déterminer les travaux à réaliser, les contraintes de temps et de ressources. Il existe un ensemble de règles définies pour déterminer le nombre de ressources, leur vitesse, les matières premières à utiliser, etc. La décision tactique a été d'utiliser les capacités des machines.

Le modèle de flow shop hybride dans notre exemple contient trois étapes de production. La première est composée de quatre machines de production parallèles, la seconde est composée de trois machines de production parallèles et la dernière d'une ligne d'assemblage avec deux machines. Les matières premières proviennent de différents fournisseurs. Chaque matière première aura moins de contraintes en termes de temps de sortie.

L'ensemble de règles sera exécuté sur les résultats de la simulation comme entrées. Les résultats de la simulation portent sur la manière dont les ressources sont exploitées pour une structure de chaîne d'approvisionnement incertaine particulière avec une séquence de planification (par exemple, si l'utilisation d'une ressource est inférieure à celle prévue, elle peut être supprimée de la liste des ressources, ou inversement) par exemple on peut augmenter la vitesse et la capacité de la machine) si la qualité de la matière première n'influence pas les contraintes temporelles, ou si les niveaux de stocks sont suffisants, et ainsi de suite. Nous avons réalisé que la simulation (dépend des commandes des clients).

### Exemple sur l'implémentation

Dans un problème de type flowshop hybride composé de 3 étages. chaque étage contient un certain nombre de machines identique en parallèle ( 4 machines dans étage 1 ;3 machines pour étage 2 et 2 machines dans étage 3 ) et 7 jobs tels que les données sont :

Pour étage 1

Taches	1	2	3	4	5	6	7
$P_i$	4	3	4	5	2	3	3
$R_i$	0	2	2	4	6	8	8
$D_i$	8	8	16	18	20	24	28

Pour étage 2

Taches	1	2	3	4	5	6	7
$P_i$	3	4	5	4	2	4	3
$R_i$	C11	C21	C31	C41	C51	C61	C71
$D_i$	11	12	21	24	26	28	32

Pour étage 3

Taches	1	2	3	4	5	6	7
$P_i$	4	3	3	4	4	2	3
$R_i$	C12	C22	C32	C42	C52	C62	C72

$D_i$	14	15	25	29	32	36	42
-------	----	----	----	----	----	----	----

En Appliquant notre méthode, nous avons obtenu la courbe suivante :

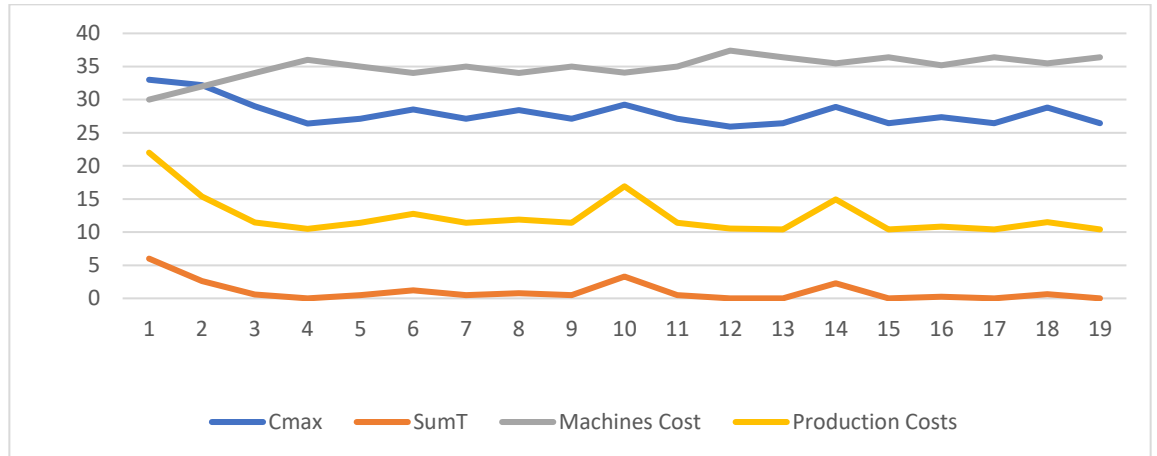


Figure 4.2: les résultats obtenus

La figure 4.2 donne les résultats de simulation pour les meilleurs modèles (axe des X). Elle montre les résultats de simulation pour les 20 meilleurs modèles proposés pour notre exemple. Les quatre courbes colorées représentent le coût de production, le coût de machine,  $\sum T$  et le  $C_{max}$ . Cette comparaison montre que le modèle numéro 4 est le meilleur, avec un temps de retard nul et un coût de production minimum, et les résultats montrent que le modèle a également la durée de vie la plus basse que les autres et de meilleures performances.

- La solution initiale

Avec notre implémentation, On a obtenu comme solution initiale suivante :

C1	T1	C2	T2	C3	T3
24	1	29	3	33	2

On a obtenu  $C_{max}=33$ ,  $\sum T=6$ , Cout Machines =30, Cout Production = 29,5.

- La solution optimale

Le module de simulation modifie les chaînes logistiques dans chaque modèle de ces 20 derniers, ce qui a un impact sur la valeur des coûts de machine. Après avoir appliqué notre méthode, la solution optimale obtenue est la suivante :

C1	T1	C2	T2	C3	T3
19,2	0	23,2	0	26,4	0

On a obtenu  $C_{max}=26.4$  ,  $\sum T=0$ , Cout Machines =36, Cout Production = 23.2.

Le tableau 4.1 présente les résultats de simulation pour les 20 meilleures propositions (alternatives/solutions) de conceptions de modèles de chaîne d'approvisionnement par le module de décision. Ces informations sur le modèle sont prises pendant le processus de simulation. Chaque résultat dépend d'un modèle et est composé de  $C_{max}$ ,  $\sum T$ , MachinesCost et Production Cost de la solution de séquence de planification proposée par le module d'optimisation opérationnelle. Le coût des ressources est le coût total des machines et des installations utilisées dans un modèle, y compris les stocks. Nous avons défini une métrique d'évaluation pour choisir le meilleur modèle, qui est la suivante :

$$ModelMetric=MachinesCost+ProductionCost+C_{max}+1.2*\sum T$$

C1	T1	C2	T2	C3	T3	MachinesCost	$C_{max}$	$\sum T$	ProductionCost
24	1	29	3	33	2	30	33	6	29,5
19,2	0	28,2	1,4	32,2	1,2	32	32,2	2,6	27,4
19,2	0	23,2	0	29	0,6	34	29	0,6	24,8
19,2	0	23,2	0	26,4	0	36	26,4	0	23,2
21,6	0	24,5	0,5	27,1	0	35	27,1	0,5	23,8
21,6	0	26,1	0,9	28,5	0,3	34	28,5	1,2	24,85
21,6	0	24,5	0,5	27,1	0	35	27,1	0,5	23,8

21,6	0	24,5	0,5	28,4	0,3	34	28,4	0,8	24,6
21,6	0	24,5	0,5	27,1	0	35	27,1	0,5	23,8
24,3	1,3	26,862 5	1,2875	29,2 625	0,68 75	34,08333	29,2625	3,275	26,26875
21,6	0	24,5	0,5	27,1	0	35	27,1	0,5	23,8
21,6	0	23,52	0	25,9 2	0	37,4	25,92	0	22,96
21,6	0	23,52	0	26,4 6	0	36,4	26,46	0	23,23
24,3	1,3	26,22	0,6475	28,9 2	0,34 75	35,48333	28,92	2,295	25,6075
21,6	0	23,52	0	26,4 6	0	36,4	26,46	0	23,23
21,6	0	23,94	0,18	27,3 6	0,06	35,2	27,36	0,24	23,8
21,6	0	23,52	0	26,4 6	0	36,4	26,46	0	23,23
21,6	0	23,52	0	28,8 075	0,60 75	35,48333	28,8075	0,6075	24,7075
21,6	0	23,52	0	26,4 6	0	36,4	26,46	0	23,23

**Tableau 4.1: les résultats de simulation**

### **4.8 Conclusion**

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. Enfin, via des expérimentations différentes, nous avons justifié la validité et l'efficacité de l'approche développée dans ce travail.



## Conclusion 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 ce travail, nous avons présenté le problème de gestion de la chaîne d'approvisionnement. Nous avons suggéré une stratégie d'optimisation de simulation avec les algorithmes génétiques comme technique d'optimisation pour résoudre ce problème.

Dans notre prototype développé, nous avons utilisé le modèle simple de la chaîne d'approvisionnement. Les commandes clients et les délais de livraison des fournisseurs permettent de déterminer les travaux à réaliser, les contraintes de temps et de ressources. Il existe un ensemble de règles définies pour déterminer le nombre de ressources, leur vitesse, les matières premières à utiliser, etc. La décision tactique a été d'utiliser les capacités des machines. Les résultats de la simulation concernent la manière d'utiliser les ressources pour une structure de chaîne d'approvisionnement particulière et incertaine avec une séquence de planification si la qualité des matières premières n'affecte pas les contraintes de temps, ou si les niveaux de stocks sont suffisants, et ainsi de suite. Les résultats de simulation sont proposés (alternatives/solutions) pour la conception de modèles de supply chain par l'unité de décision. Ces informations sur le modèle sont prises pendant le processus de simulation. Chaque résultat est basé sur un modèle et comprend  $C_{max}$ ,  $\sum T$ , MachinesCost et coût de production pour résoudre la séquence de planification comme suggéré par le module d'optimisation opérationnelle. Le coût des ressources correspond au coût total des machines et des installations utilisées dans le modèle, y compris les stocks. Nous avons défini la métrique d'évaluation pour choisir le meilleur modèle.

Pour l'avenir et comme perspectives, dans un premier temps, nous envisageons d'enrichir les règles de pilotage pour une simulation plus réaliste et intelligente des chaînes logistiques.

## Conclusion générale

Dans un deuxième temps, nous allons examiner d'autres algorithmes génétiques multicritères. 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.

## ملخص

في هذا العمل، اقترحنا منهجية التحسين والمحاكاة التي تعالج مشكلة إدارة سلسلة التوريد. ولحل هذه المشكلة تم اقتراح بنية لتطوير أنظمة القرار الأمثل التي تعطي متخذ القرار مجموعة من الحلول الأمثل للاختيار من بينها. تعتمد هذه البنية على منهج تحسين المحاكاة الذي يتضمن وحدة تحسين متعددة الأهداف ووحدة محاكاة. تعتمد وحدة التحسين على الخوارزميات الجينية، ويتم استخدام وحدة المحاكاة لتقييم النماذج التي تمت دراستها في التحسين. إن تحسين وقت التصنيع والتأخير الإجمالي وتكاليف الإنتاج الإجمالية للإنتاج بأكمله هي أهداف عملنا. يمكن أن يوفر هذا النهج حلاً فعالاً وممكنة ودقيقة

**الكلمات المفتاحية:** سلسلة التوريد، التخطيط والتحسين القائم على المحاكاة.

---

## Résumé

Dans ce travail, nous proposons une approche d'optimisation et de simulation qui aborde le problème de la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une architecture pour le développement de systèmes de décision optimaux qui donne au décideur un ensemble de solutions optimales parmi lesquelles choisir. Cette architecture est basée sur l'approche d'optimisation par simulation qui comprend un module d'optimisation multi-objectifs et un module de simulation, le module d'optimisation est basé sur des algorithmes génétiques, et le module de simulation est utilisé pour évaluer les modèles étudiés dans l'optimisation. L'optimisation de la durée de fabrication, des retards totaux et du total des coûts de production de l'ensemble de la production sont les objectifs de notre travail. Cette approche peut fournir des solutions efficaces, réalisables et exactes.

**Mots clés :** chaîne d'approvisionnement, planification et optimisation basée sur la simulation.

---

## Abstract

In this work, we propose an optimization and simulation approach that addresses the supply chain management problem. To solve this problem, we proposed an architecture for developing optimal decision systems that gives the decision maker a set of optimal solutions to choose

## Résumé

from. This architecture is based on the simulation-optimization approach which includes a multi-objective optimization module and a simulation module, the optimization module is based on genetic algorithms, and the simulation module is used to evaluate the models studied in the optimization. Optimization of manufacturing time, total delays, and total production costs of the entire production are the objectives of our work. This approach can provide effective, feasible, and accurate solutions.

**Keywords:** supply chain, scheduling, and simulation-based optimization.

# Bibliographie

- [1] Pons J., Chevalier P., (1996). La logistique intégrée, P. 34-35, Hermes.
- [2] Engles D.W., (1978). Alexander the great and the logistics of the Macedonian Army, Los Angeles, CA, University of California Press.
- [3] Tayur S., Ganeshan R., M. Magazine. (1999), Quantitative models for supply chain management, Kluwer Academic Publishers.
- [4] Lee H.L. et Billington C, (1993), "Material management in decentralized supply chain", Operations Research, vol 41, n°5, p. 835-847.
- [5] New S.J. et P. Payne, (1995), "Research framework in logistics : three models, seven dinners and a survey", International Journal of Physical Distribution and logistics management, 25 (10).
- [6] Lin F.R. et Shaw M.J., « Reengineering the Order Fulfillment Process in Supply Chain Networks », International Journal of Flexible Manufacturing Systems, n° 10, pp. 197- 229, 1998.
- [7] Beamon B.M., Chen V.C.P., « Performance Analysis of Conjoined Supply Chain », International Journal of Production Research, vol. 39, n° 14, pp. 3195-3218, 2001.
- [8] Laurent Cheyroux. Sur l'évaluation de performances des chaines logistiques. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003. Français.
- [9] Ganeshan, Ram, and Terry P. Harrison, (1995). An Introduction to Supply Chain management. Department of Management Sciences and Information Systems, 303 Beam Business Building, Penn State University, University Park, PA, USA.
- [10] Hugos M., (2003). Essentials of supply chain management. John Wiley and sons, Inc, New Jersey, USA.
- [11] Mentzer J.T., Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G., (2001). Journal of business logistics Management, vol 22 (2).
- [12] Vidal C.J., et Goetschalckx M., (1997). Strategic production-distribution models : a critical review with emphasis on global supply chain models. European Journal of Operational Research, vol (98), 1-18.
- [13] Taylor D.A., (2003). Supply Chains: A Manager's Guide. Addison Wesley, USA.
- [14] Hermann J.W., Lin E., Pundoor G., (2003). Supply Chain Simulation Modeling Using The Supply Chain Reference Model. Proceedings of DETC'03, 1-9, Chicago, USA.

## Bibliographie

---

- [15] Ding H., (2004). Une Approche d'Optimisation Basée sur la Simulation pour la Conception de Chaînes Logistiques : Application dans les Industries Automobiles et Textiles. Thèse de doctorat, Université de Metz.
- [16] Younes BAHMANI. Optimisation multicritère de l'ordonnancement des activités de la production et de la maintenance intégrées dans un atelier Job Shop. PhD thesis, Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2, 2017.
- [17] Agnès Letouzey. Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001.
- [18] R.N. Anthony. Planning and control systems: a framework for analysis. Studies in management control. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, 1965.
- [19] GIARD Vincent. Gestion de la production. Economica, Paris, 1988.
- [20] Georges Javel. Organisation et gestion de la production-4e édition : Cours, exercices et études de cas. Dunod, 2010.
- [21] Thomas Morton and David W Pentico. Heuristic scheduling systems: with applications to production systems and project management, volume 3. John Wiley & Sons, 1993.
- [22] Joseph YT Leung. Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, Florida, 2004.
- [23] Michael Pinedo. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer, 2016.
- [24] Georges Javel and Joel Le Bert. L'Organisation et la Gestion de Production. Masson, 1993.
- [25] Thierry Coudert. Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement: application aux fonctions production et maintenance. PhD thesis, Toulouse, INPT, 2000.
- [26] Ronald L Graham, Eugene L Lawler, Jan Karel Lenstra, and AHG Rinnooy Kan. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. Annals of discrete mathematics, 5 :287–326, 1979.
- [27] W.Trabelsi, ordonnancement des systèmes de production flexibles soumis à différent type de contraintes. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine , 2012 .
- [28] Johnson, S.M. Optimal Two and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included. Naval Research Logistics Quarterly, vol. 1, pp. 61-68, 1954.

## Bibliographie

---

- [29] Garey, M.R., D.S. Johnson et R. Sethi. The complexity of job-shop and flow-shop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, vol. 1, 1976.
- [30] Potts, C.N. An adaptive branching rule for the permutation flow-shop problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 5, pp. 19-25, 1980.
- [31] Tseng, F. T., E. F. Stafford Jr. et J.N.D. Gupta. An empirical analysis of integer programming formulations for the permutation flowshop. *OMEGA*, vol. 32, pp. 285-293, 2004.
- [32] Nawaz, M., E. Enscore et I. Ham. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *OMEGA, The International Journal of Management Science*, vol. 11(1), pp. 91-95, 1983.
- [33] Ruiz, R. et C. Marotto. A comprehensive review and evaluation of permutation Flow-Shop heuristics. *European Journal of Operational Research*, vol. 165, pp. 479-494, 2005.
- [34] Taillard, E. Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 47, pp. 65-74, 1990.
- [35] Gupta, J.N.D. Two-stage hybrid flow-shop scheduling problem. *Journal of Operational Research Society*, vol. 39(4), pp. 359-364, 1988.
- [36] Hoogeveen, J.A., J.K. Lenstra, and B. Veltman. Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is np-hard. *European Journal of Operational Research*, vol. 89, pp. 172-175, 1996.
- [37] Haouari, M., L. Hidri, et A. Gharbi. Optimal Scheduling of a two-stage hybrid Flow-Shop. *Mathematical Methods of Operations Research*, vol. 64, pp.107-124, 2006.
- [38] Perregaard M. Branch-and-Bound methods for the multi-processor Job Shop and Flow Shop scheduling problems. Master's Thesis, Datalogisk institute Kubenhavns Universitet, 1995.
- [39] Carlier, J. et E. Néron. An exact method for solving the multiprocessor flow shop. *RAIRO - Operations Research*, vol. 34(1), pp. 1-25, 2000.
- [40] Lee, C.Y. et R.G. Vairaktarakis. Minimizing makespan in hybrid flowshops. *Operation Research Letters*, pp. 149-158, 1994.
- [41] Haouari, M. et R. M'Hallah. Heuristic algorithms for the two-stage hybrid flow-shop problem. *operations research letters*, vol. 21, pp. 43-53, 1997.

- [42] Riane, F., A. Artiba, et S.E. Elmaghraby. A hybrid three-stage flow-shop problem: Efficient heuristics to minimize makespan. *European Journal of Operational Research*, vol. 109, pp. 321-329, 1998.
- [43] Gourgand, M., N. Grangeon et S. Norre. Metaheuristics for the deterministic hybrid flow shop problem. *Proceeding of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, Glasgow, United Kingdom, pp. 136-145, 1999.
- [44] Jin, Z., Z. Yang et T. Ito. Metaheuristic algorithms for the multistage hybrid flowshop scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, vol. 100(2), pp. 322-334, 2006.
- [45] Ruiz, R., C. Maroto et J. Alcaraz. Solving the flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup times using advanced metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, vol. 165(1), pp. 34-54, 2005.
- [46] Kahraman, C., O. Engin, I. Kaya et M.K. Yilmaz. An application of effective genetic algorithms for solving hybrid flow shop scheduling problems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 1(2), pp. 134-147, 2008.
- [47] Portmann, M. C., A. Vignier, D. Dardilhac et D. Dezalay. *European Journal of Operational Research*, vol. 107, pp. 389-400, 1998.
- [48] Ingalls R .G., The value of simulation in modeling supply chains. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, pp. 1371 -1375 , Washington, (1998).
- [49] M.KACIMI, Etude comparative des algorithmes génétiques pour un problème d'ordonnancement d'atelier M-Machines identiques en parallèles, Master, 2019.
- [50] 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).

