

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université Aboubakr Belkaïd

Tlemcen

Faculté de Technologie



جامعة ابو بكر بلقايد

تلمسان

كلية التكنولوجيا

## Mémoire de fin de D'études

Présenté par : **BENAMARA SEIFEDDINE**

&

**HAMDANI AHMED**

Pour l'obtention du **diplôme de Master En Génie Industriel**

Spécialité: **Ingénieur de production &**

**Chaîne logistique**

*Résolution d'un problème d'ordonnancement dans un atelier flexible de production avec une méthode hybride*

Soutenu le / 09 / 2022

Devant le jury :

**M. HADRI Abdelkader**

**MAA**

**Président**

**Mme. GHOMRI Latifa**

**PR**

**Examineur**

**Mme. ABDELLAOUI Wassila**

**MAB**

**Examineur**

**Mme. KEDDARI NASSIMA**

**MCB**

**Encadrant**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Dédicace*

*À ma très chère mère "Mokhtaría"*

*À l'occasion de mes fins d'études je veux remercier*

*L'amour de ma vie, ma source de courage et la*

*lumière de mes jours ma chère mère*

*À mon exemple et la personne qui toujours sacrifie*

*pour me voir réussi mon chère père " Mohamed"*

*À la flamme de mon cœur, mon amour et mon*

*bonheur "ma grand-mère Zohra"*

*À mes chères sœurs et frères, mes nièces et mon petit*

*neveu "Yahía"*

*À mes enseignants et ma collègue "Mokhtaría"*

*qui mon aidés et encourager dans mon long parcours*

*à l'université de Aboubakr Blkaïd-Tlemcen*

*--Seifeddine--*

# *Dédicace*

*Je veux dédier ce modeste travail*

*À ma chère mère "Khadija Bennacer"*

*Qui m'a toujours soutenu et encouragé à atteindre ce  
que je suis*

*À mon cher père "Mohamed"*

*Qui s'est beaucoup sacrifié pour nous et grâce à ses  
efforts et ses sacrifices, j'ai rejoint ce jour*

*À mes chères "grand-mère" et "grand père"*

*À mon frère "Ibrahim" qui m'a aidé et soutenu  
durant mes études*

*À toute la famille "Hamdani" et "Bennacer"*

*À mon camarade de primaire "Oussama*

*Mansouri" que j'ai toujours trouvé en cas de besoin*

*À tous mes enseignants et camarades dans mon  
parcours à l'université de Aboubakr Blkaïd-Tlemcen*

*--Ahmed--*

# Remerciement

*Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la volonté d'effectuer ce travail et d'atteindre notre objectif*

*Nous devons remercier nos parents pour tous leurs efforts depuis notre naissance jusqu'à ce moment.*

*Nous exprimons également notre gratitude à Mme **Keddari Nassima** pour son encadrement, ses conseils et son assistance, et pour son soutien depuis le début de ce travail.*

*Nous remercions sincèrement les membres du jury d'avoir accepté de venir juger notre travail. Nous les remercions également pour leur lecture attentive de notre thèse et pour tous les remarques qu'ils nous feront parvenir afin d'améliorer notre travail.*

*Merci beaucoup à nos familles et amis pour leur soutien et d'être avec nous, merci à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin pour atteindre ce niveau qui nous permettra de garantir notre avenir.*

# Tables des matières

<i>Liste des figures</i>	□
<i>Liste des tableaux</i>	□□
<i>Liste des abréviations</i>	□□□
<i>Introduction Générale</i>	□□□□
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre 1 : L'ordonnancement dans les systèmes de production</i>	□□□□
<b>I.1. Introduction :</b>	3
<b>I.2 Industrie 4.0</b>	3
<b>I.3 La production</b>	3
<b>I.4 Les systèmes de productions</b>	4
I.4.1 Les trois éléments de la production	5
I.4.2 Les typologies des systèmes de production	5
<b>I.5 Les systèmes flexibles de production</b>	6
<b>I.6 La gestion de production</b>	7
I.6.1 Les différents niveaux hiérarchiques de décision pour la gestion de production	8
<b>I.7 Rôle de l'ordonnancement dans la gestion de production :</b>	9
<b>I.8 Généralité sur l'ordonnancement</b>	10
<b>I.9 Le problème d'ordonnancement</b>	11
<b>I.10 Les éléments du problème d'ordonnancement</b>	11
I.10.1 Les tâches	11
I.10.2 Les ressources	12
I.10.3 Les contraintes :	12
I.10.4 Les objectifs	13
I.10.5 Notation	14
<b>I.11 Classification des problèmes d'ordonnancement</b>	16
I.11.1 Une seule machine	16
I.11.2 Machine parallèle	16
I.11.3 Le type flow-shop	16
I.11.4 Le type flow-shop hybride	17
I.11.5 Le type job-shop	17
I.11.6 Le type job-shop hybride	18
I.11.7 Le type open-shop	18
<b>I.12 Organisation d'ateliers</b>	18

<b>I.13</b>	<b>Notation de la complexité des problèmes</b>	<b>19</b>
I.13.1	La classe NP	20
I.13.2	La classe P	20
I.13.3	La classe NP-Complet	20
<b>I.14</b>	<b>État de L’art</b>	<b>22</b>
<b>I.15</b>	<b>Conclusion</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre 2 : Les méthodes de résolution pour les problèmes d’ordonnancement □□□□</b>		
<b>II.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>II.2</b>	<b>Les méthodes de résolution</b>	<b>27</b>
II.2.1	Méthodes exactes	27
II.2.2	Méthodes approchées	29
II.2.3	Les méthodes hybride	31
<b>II.3</b>	<b>La méthode adaptée</b>	<b>33</b>
II.3.1	La recherche taboue	34
II.3.2	L’optimisation par essaim particulaire	35
<b>II.4</b>	<b>Le choix de l’hybridation</b>	<b>37</b>
<b>II.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
<b>Chapitre 3 : Une approche hybride pour la résolution d’un flow shop hybride _□□□□</b>		
<b>III.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>39</b>
<b>III.3</b>	<b>Les modèles du Flow-Shop hybride</b>	<b>39</b>
III.3.1	Présentation	40
<b>III.4</b>	<b>Modélisation mathématique et résolution</b>	<b>41</b>
III.4.1	Indice	42
III.4.2	Paramètre	42
III.4.3	Le problème	42
III.4.4	Les variables de décisions	43
<b>III.5</b>	<b>Résultats et comparaison</b>	<b>45</b>
III.5.1	Étude de cas	45
III.5.2	Mise en œuvre de SPT	47
III.5.3	Mise en œuvre de OEP	49
III.5.4	Mise en œuvre de la recherche tabou :	51
<b>III.6.1</b>	<b>Les comparaisons avec les autres algorithmes</b>	<b>52</b>
<b>III.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>54</b>
<b>Conclusion Générale</b>		<b>□□□□</b>
<b>Conclusion générale</b>		<b>58</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>59</b>
<b>Résumé</b>		<b>59</b>

## *Liste des figures*

<i>Figure 1: les sous-systèmes constituant le système de production [FON 99]</i>	4
<i>Figure 2 : Les éléments de la production</i>	5
<i>Figure 3: Les interactions dans l'entreprise</i>	7
<i>Figure 4: Organisation hiérarchique fonctionnelle</i>	8
<i>Figure 5: sous fonctions d'ordonnancement dans l'atelier [JAV 04]</i>	10
<i>Figure 6: Les éléments de la tâche</i>	11
<i>Figure 7: La Représentation typologie des différents types de ressources</i>	12
<i>Figure 8: Flow shop simple à 4 machines</i>	17
<i>Figure 9: Quatre Étages de travail avec des machines identique</i>	17
<i>Figure 10: Job shop avec 4 machines</i>	18
<i>Figure 11: job shop hybride</i>	18
<i>Figure 12: Relation entre les différentes organisations</i>	19
<i>Figure 13: Différence entre les classes d'un problème</i>	20
<i>Figure 14: Analyse d'un problème d'ordonnancement</i>	31
<i>Figure 15: Différentes stratégies d'hybridation [DUV 00]</i>	33
<i>Figure 16: L'organigramme de la recherche tabou</i>	35
<i>Figure 17: L'organigramme de l'algorithme de OEP</i>	37
<i>Figure 18: Exemple de flow shop hybride à k étages et n jobs</i>	40
<i>Figure 19: Organigramme de l'hybride de l'optimisation des essais de particules et la recherche tabou</i>	44
<i>Figure 20: le code pour générer les étapes et les codes machines sous Matlab</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Figure 21: diagramme de Gantt par la règle SPT obtenir par LEKIN</i>	47
<i>Figure 22: résultat des performances obtenir par LEKIN</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Figure 23: résultat des temps d'entrer et sortie des jobs obtenir par LEKIN</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Figure 24: Codage d'un job</i>	50
<i>Figure 25: Codage des machines de tous les étage avec le séquençement des jobs</i>	51
<i>Figure 26: Un diagramme de Gantt afficher par Matlab pour l'ordonnancement de SPT_OEP</i>	51
<i>Figure 27: Cmax obtenu par notre méthode sous Matlab</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Figure 28: Codage des machines de tous les étage avec le séquençement des jobs</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Figure 29: le Makespan optimal pour les quatre algorithmes</i>	50



## **Liste des tableaux**

<b>Tableau 1:</b> les type de contraintes les plus rencontrés en ordonnancement [BAP 98][BEN 09]	13
<b>Tableau 2:</b> Les notations standard pour le problème d'ordonnancement [GRA 79]	15
<b>Tableau 3:</b> Quelques notations en ordonnancement	16
<b>Tableau 4:</b> Classe de complexité de problème d'ordonnancement	21
<b>Tableau 5:</b> Etat de l'art	24
<b>Tableau 6:</b> Brève introduction à nos algorithmes	38
<b>Tableau 7:</b> Des notations utilisés dans la modélisation de notre atelier HFSP	39
<b>Tableau 8:</b> Les temps de traitement dans l'ordonnancement d'atelier de flow shop hybride	45
<b>Tableau 9:</b> la représentation des notations du fonctionnement de HFS	46
<b>Tableau 10:</b> Les opérations et les machines sélectionnées pour la génération de la solution initiale	48
<b>Tableau 11:</b> Réglage du paramètre de l'OEP	50
<b>Tableau 12:</b> Réglage du paramètre de RT52	
<b>Tableau 13 :</b> Réglages des paramètres dans le HFSP	54
<b>Tableau 14 :</b> Comparaisons des optimisations dans HFS	55

## ***Liste des abréviations***

***PSE*** : Procédure par Séparation et Evaluation

***B & B***: Branch and Bound

***FIFO***: First in First Out

***SPT***: ShortestProcessing Time

***LPT***:LongestProcessing Time

***EDD***: Earliest Due Date

***SRPT***: ShortestRemainingProcessing Time

***LIFO*** : Last In Last Out

***OEP*** : L'optimisation par essaim de particules (de l'anglais : Particle Swarm Optimization)

***RT***: la recherche tabou (de l'anglais : Tabu search)

***FWA*** : algorithme feu d'artifice (de l'anglais : Firework algorithme)

***IFWA*** : Algorithme amélioré des feux d'artifice (de l'anglais : The Improved Fireworks Algorithm )

***WOA*** : Algorithme d'optimisation des baleines (de l'anglais : Whale optimization algorithm)

***HFS*** : flow shop hybride (de l'anglais : hybrid flow shop)



***Introduction Générale***

## *Introduction générale*

L'entreprise vise actuellement sa position sur un marché concurrentiel en développant ses performances commerciales en matière d'allongement de la portée de fabrication en tenant compte des délais, de produire des produits de grande qualité et de suivre des étapes d'ingénierie afin de réduire les coûts de possession des produits.

Comme les marchés évoluent et se développent beaucoup, les entreprises cherchent à satisfaire les besoins du marché et des clients face à la concurrence. De ce point de vue, les entreprises travailleront pour mettre en place des étapes et des fonctions qui donneront un bon résultat et une plus grande rentabilité, l'une des fonctions les plus importantes est l'ordonnancement.

L'ordonnancement est un tournant important et efficace dans l'amélioration de la gestion de la production pour les entreprises et les industries, qui a connu des grands changements à sa situation actuelle. L'ordonnancement est considéré comme l'un des plus grands outils de gestion de la production car il gère la production avec une plus grande rentabilité, et c'est ce qui fonctionne pour le succès des entreprises. Il est un processus décisionnel, et dans l'industrie, le processus décisionnel est l'organisation de la fabrication du produit en vue de réduire au minimum la durée totale de fabrication [RUH 07].

On sait que les objectifs des entreprises sont de maximiser la production tout en réduisant les coûts. Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire d'optimiser l'ordonnancement des travaux de l'atelier de production et de découvrir les problèmes existant dans l'ordonnancement de l'atelier.

On rencontre différents problèmes d'ordonnancement selon la disposition des machines, il est très varié. Dans cette étude, nous ciblerons un problème d'ordonnancement de nature flexible, cela nous amènera à proposer une méthode de solution à ce problème à un moment précis.

Il existe un large éventail des méthodes de recherche opérationnelle regroupées en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées (heuristiques et métaheuristiques).

Aussi, il existe aussi des modèles hybrides basés sur la collaboration de différentes méthodes de résolution pour obtenir des solutions optimales à partir des caractéristiques des algorithmes collaborés. Dans ce chapitre on va vous présenter les notions de base relatives aux problèmes d'ordonnancement et leurs méthodes de résolution.

## Introduction générale

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons un aperçu des systèmes de production et leurs gestions ainsi que les problèmes d'ordonnancement aussi nous élaborons un état de l'art des techniques de résolution couvrant les travaux de recherches menés sur les problèmes d'ordonnancement.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons en premier lieu les différentes méthodes de résolution tell que les méthodes approchées et les méthodes exactes ensuite nous présentons la méthode adaptée dans le cadre d'un Flow Shop Hybride.

Dans le troisième chapitre, nous expliquons la démarche hybride décrite ci-dessus. Nous concluons le présent chapitre en résumant les résultats que nous avons obtenus afin d'évaluer et de comparer les méthodes proposées.



***Chapitre 1 : L'ordonnancement  
dans les systèmes de production***

### **I.1. Introduction :**

Le système de production désigne un groupe de pièces interconnectées afin de compléter le processus de production. Le fonctionnement et la conception de ce système posent de nombreux problèmes, dont les principaux sont : les problèmes de dimensionnement, de planification, de compréhension des rouages internes et de définition des règles de gestion [GOU 03].

L'ordonnancement a connu une évolution remarquable au cours des dernières années, c'est comme un champ d'investigation, il est utilisé dans plusieurs disciplines, dont la plus importante et la gestion du travail [RUH 07].

Les problèmes d'ordonnancement se posent dans tous les domaines de l'économie : informatique (les tâches sont des procédures, les ressources sont des processus), construction (suivi de projets), industrie (activités d'atelier en production et problèmes logistiques) [GOT 93].

Dans ce chapitre nous allons introduire les généralités sur la fonctionnalité de la gestion et de la production et aussi présenter les notions de base relatives à l'ordonnancement.

### **I.2 Industrie 4.0**

La relation entre l'homme et la machine est de plus en plus coopérative. Cette collaboration en réseau se caractérise par un échange continu et immédiat entre les moyens de production et les moyens d'approvisionnement [DAM & al 21]

La quatrième révolution industrielle est l'automatisation des processus industriels et de fabrication traditionnelle à l'aide de technologies telles que l'Ido industriel, l'analyse des mégas données, l'intelligence artificielle, la robotique et les systèmes autonomes.[1]

L'industrie 4.0 a pour objectif de :

- Améliorer les capacités, la rentabilité et les conséquences du méandre de de production.

- Faire en sorte que la production soit souple et axée sur le client.

- Réduction des frais de fonctionnement et d'entretien.

### **I.3 La production**

GIARD définit la production comme étant une transformation des ressources appartenant à un système productif qui mène à la création de biens et de services. [GIA 88]

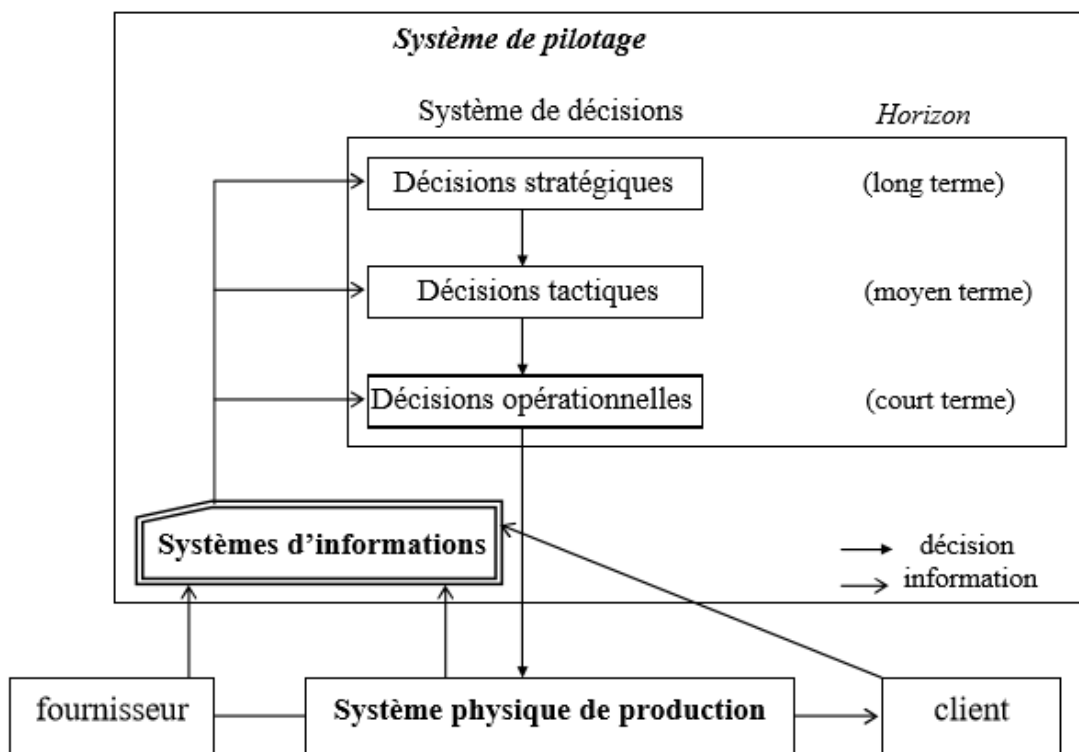
La production est une activité de traitement qui transforme des matières bruts et/ou composants, qui peuvent être décrits comme bruts en produits finis plus sophistiqués et à plus forte valeur économique. [XIA 94]

#### I.4 Les systèmes de productions

Un système de production est tout ce qui sert à transformer un ensemble de matières premières ou de composants semi-finis en produits finis.

La conversion des matières premières en produit finie se fait par un ensemble des ressources de quatre types comme : des matériels (machines, outils, moyens de transport, ...), des ressources humaines qui font une bonne utilisation du processus de transfert des produits à divers stades de fabrication (matières premières, produits semi-finis), et des stocks. [MOU 06]

Le but du système de production est d'offrir aux clients des produits de qualité à des prix concurrentiels tout en respectant les échéances. Elle a besoin d'améliorer ses produits et ses temps de livraison avec la diminution du coût de production. [XIA 94]



**Figure 1:** les sous-systèmes constituant le système de production [FON 99]

Les sous-systèmes de système de production sont comme la suite [FON 99] :

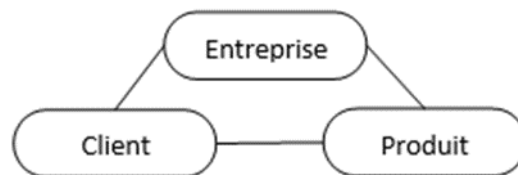
- **Le système physique de production :** Ce système contient des ressources humaines et physiques pour convertir les matières premières en produits finis.
- **Le système de décision :** Prise de points basée sur les conjonctures envoyées par la cavalcade d'information pour organiser les activités et contrôler le système physique.



- **Le système d'information** : Interventions à différents niveaux : à liaison là-dedans les systèmes de sens et d'élaboration et de production ; au sein du système de prise de décision pour gérer les informations utilisées lors de la prise de décision ; et au sein du système de production physique. Son rôle consiste à recueillir, à conserver et à transmettre des renseignements de différents types.

#### I.4.1 Les trois éléments de la production

Aucune entreprise ne peut réussir sans clients, car les **clients** ont constamment besoin de nombreux **produits** fabriqués par **l'entreprise** qui peuvent être utilisés dans divers domaines. Ce faisant, les entreprises cherchent à fidéliser les clients et à acquérir de nouveaux clients en interagissant avec eux, en gérant les tâches et le service après-vente et fournir des bons produits et d'autres activités qui assure la satisfaction des clients et l'obtention d'un client plus fidèle.



**Figure 2** : Les éléments de la production

---

#### I.4.2 Les typologies des systèmes de production

Dans le cadre de la gestion et de l'organisation des systèmes de production, la dépendance se fera sur les ressources disponibles qui sont nécessaires, et ceci pour répondre et s'adapter au processus de fabrication complexe.[XIA 94]

GIARD [GIA 88] a fait proposer deux typologies des systèmes de production qui sont les plus naturelles comme la suite. [XIA 94]:

##### 🚦 La première typologie

Le système de production est basé soit sur la production pour répondre à la demande (production à la demande), soit pour reconstituer les stocks (production prévisionnelle).

##### 🚦 La deuxième typologie

Elle est accordée avec un style dont se déroule la production [JAV 93] [MUL 93], Quatre types d'organisation sont possibles :

- **Organisation en ligne de fabrication**

Dans ces méthodes, les produits seront inévitablement fabriqués en passant dans un ordre séquentiel sur les équipements préfabriqués pour que ce type d'industrialisation soit réussi. La spécialisation des équipements est la plus nécessaire dans ce mode d'organisation. Ce mode d'organisation a un avantage de la simplicité de sa gestion. [XIA 94]

- **Organisation en ateliers spécialisés**

Ce mode d'organisation nous donne une flexibilité du système, mais en d'autre coté l'utilisation des machines n'est pas bien équilibrée que dans le groupement en ligne de fabrication, dans ce type d'organisation nous pouvons réaliser plusieurs opérations en assemblant des équipements ayant le même travail et la fonction technique en un même endroit. [XIA 94]

- **Organisation en production unitaire**

Il s'agit d'une bonne planification de la succession des différentes tâches pour la production de certains produits plus longs à fabriquer. [XIA 94]

- **Industrie de processus ou production continue**

Les produits manufacturés sont traités pratiquement en continu. On trouve ce genre d'organisation en particulier dans l'industrie chimique ou sidérurgique [XIA 94]

### **I.5 Les systèmes flexibles de production**

À la lumière du développement que connaissent les industries mondiales, toutes les entreprises industrielles visent à développer leur capacité de production sur plusieurs points spécifiques, dont le plus important est la capacité et la mise à disposition de méthodes possibles et d'une gestion appropriée pour la production de divers types et pièces avec changer les quantités de production, c'est ce qu'on appelle la flexibilité, et nécessite un système spécifique pour la gestion de la production, d'autant plus que l'ordonnancement est sous forme numérique.

Actuellement, les entreprises industrielles se sont tournées vers la méthode de production moderne qui dépend des ateliers en réseaux de machines multitâches à la place d'ancienne méthode ligne de transfert machine mono-tâche pour le but et de fabriquer des produits divers de petite ou moyenne série, conduit à des systèmes plus souples, une production automatique des pièces nombreuses et une quantité variable.

Un système de production a la capacité de stimulé ou de gérer la diversité tout en créant un équilibre de gestion et de maintien de son travail en réponse aux changements de

l'environnement, soit en interne (pannes de machines, absences des employés, etc.) soit en externe (commandes urgentes...).

### I.6 La gestion de production

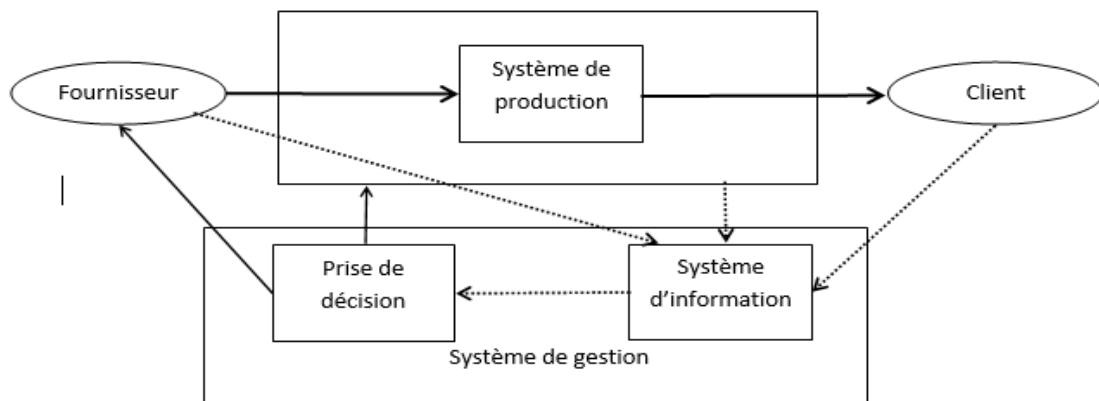
Une définition générale et classique :

Elle est considérée comme la fonction par laquelle le processus de production réussit selon toutes les conditions qui déterminent à leur tour le succès des sociétés de production en termes de qualité, de temps et de coûts.

Un système de gestion de production a pour but de s'assurer que tous les moyens de production sont utilisés correctement à tout moment, faire du bon travail pour gérer de la production avec des décisions différentes en fonction de l'information mise à jour.[XIA 94]

La prise de décision se fait par un système d'information, cette dernière doit collecter plusieurs informations sur la situation de la fabrication et ce qu'elle a atteint maintenant, en plus des informations sur les commandes et les prévisions disponibles, et grâce à elle, nous pouvons également avoir une vue complète des développements du marché et de la technique et revoir les étapes du système de gestion.[XIA 94]

La figure suivante montre la relation entre le système de production et la gestion de production dans l'entreprise :



**Figure 3:** Les interactions dans l'entreprise

### I.6.1 Les différents niveaux hiérarchiques de décision pour la gestion de production

Le rôle de ce système est la commande du système de production par l'intermédiaire de décisions, qui ils ont réparti en trois catégories [XIE 89] :

- **Les décisions stratégiques**

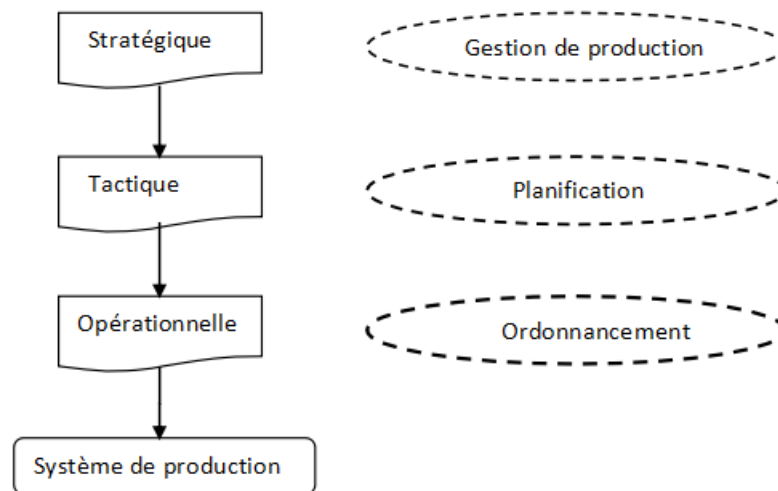
Ces décisions déterminent la politique de l'entreprise par une formulation de long terme, pour bien conditionner son avenir. Ils sont liés aux objectifs principaux i-e les décisions d'investissement ou d'embauche. [XIA 94]

- **Les décisions tactiques**

Elles sont contraintes par les décisions stratégiques afin de lier entre les décisions opérationnelles et les décisions stratégiques afin de contrôler la planification de la production en fonction de la demande. Ce sont des décisions à moyen terme.[XIA 94]

- **Les décisions opérationnelles**

Elles assurent l'exécution de la planification et la mise en place d'activités et de flexibilité quotidienne nécessaire par des décisions prises à court terme pour faire face aux aléas. [XIA 94]



**Figure 4:** Organisation hiérarchique fonctionnelle

Les décisions seront prises en fonction de critères d'amélioration par les systèmes de gestion de la production, l'ordonnancement n'est donc qu'un moyen de prendre des décisions et de les mettre en œuvre de manière efficace.

### **I.7 Rôle de l'ordonnancement dans la gestion de production :**

Les dispositions sont divisées par le modèle général de gestion de la production en trois sections : logistique et tactique (planification à long et moyen terme). Le deuxième niveau est le niveau opérationnel (gestion quotidienne et contrôle du flux des ressources et du travail. Cette séquence entraîne une mesure des responsabilités Gestionnaire, Département, Agent,) en fixant une période (long, court, moyen terme). [ESQ & LOP 99].

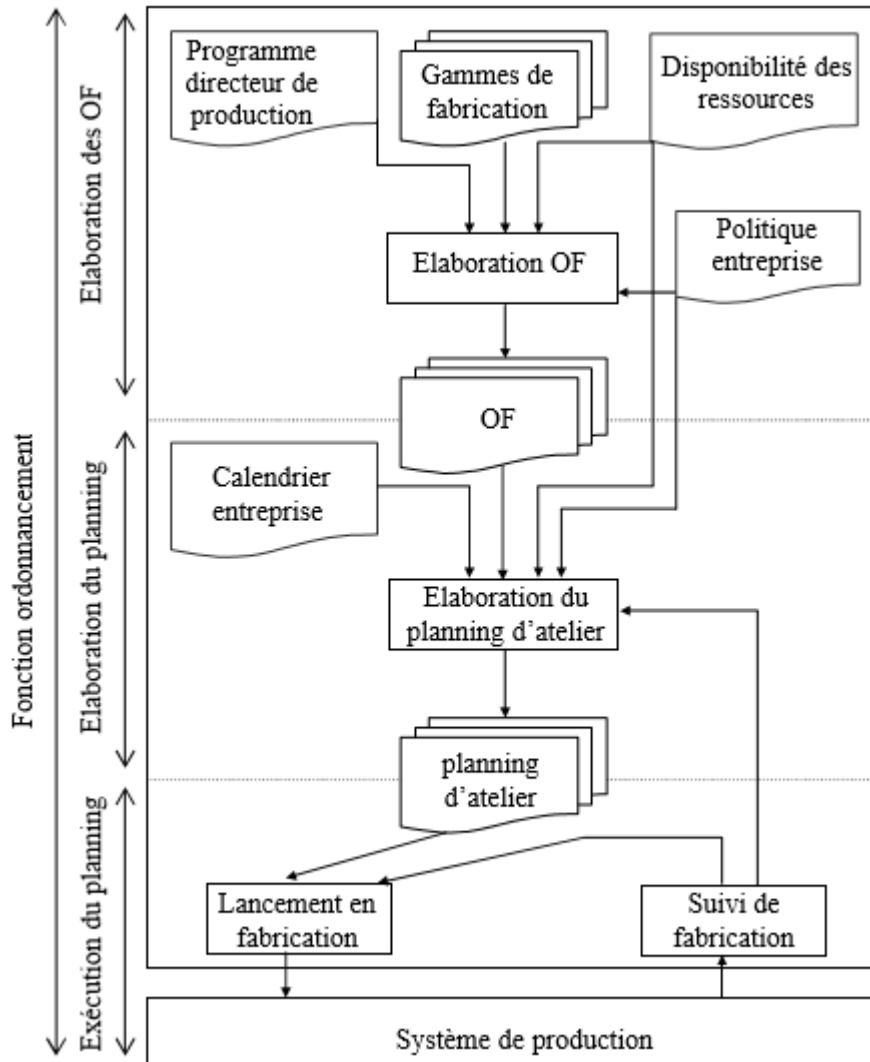
Certains des événements inattendus et soudains qui viennent au hasard causent le problème de l'ordonnancement et le résoudre au niveau supérieur est difficile.

Alors dans ce cas la fonction d'ordonnancement varie entre ses niveaux stratégiques et opérationnels. [ESQ & LOP 99].

Elle met en œuvre des dispositions prises à des niveaux supérieurs et s'intéresse à la transformation des décisions déterminées par le programme de production principal en instructions de mise en œuvre distinctes visant à contrôler l'activité des postes de travail à court terme.

Les postes fournis sont réaffectés en tant qu'intrants aux diverses ressources au cours de périodes précises. C'est après que la fonction de planification est retirée et que la planification est obtenue. Ce tableau vise à atteindre de nombreux objectifs qui sont divisés en trois sous-fonctions : **Figure 5**.

- L'élaboration des ordres de fabrication (OF) : est le processus de conversion de l'information du programme directeur de production (suggestion de fabrication) en OF.
- L'élaboration du planning d'atelier : détermine selon les commandes de fabrication (FI) et les ressources disponibles. Le calendrier prévisionnel de fabrication.
- Initiation et surveillance des activités de production.



**Figure 5:** sous fonctions d'ordonnancement dans l'atelier [JAV 04]

### I.8 Généralité sur l'ordonnancement

Il existe plusieurs définitions pour le terme d'ordonnancement :

(PINEDO 1995) définissent l'ordonnancement comme étant « l'allocation de ressources (humaines et techniques) aux jobs, tout en fixant les périodes et leurs buts pour optimiser un ou plusieurs objectifs ». [MOH 18]

L'ordonnancement est considéré comme le responsable de la planification, dont le rôle est centré sur l'affichage des tâches ou leur agencement selon des horaires précis et alloués, après avoir rempli les conditions qui sont à l'origine les critères de dates.

Une autre petite définition d'après les littératures du mot ordonnancer : Planifier un ensemble de tâches signifie programmer leur exécution en affectant les ressources nécessaires et en établissant leur date de démarrage. [GOT 93]

Donc, la fonction d'ordonnancement est d'ordonner l'organisation et mise en œuvre des tâches dans le temps dans le respect des délais et des contraintes.

### I.9 Le problème d'ordonnancement

Un problème d'ordonnancement consiste à [GOU 03] :

- Déterminer les dates de début des produits dans le système.
- Trouver une ordonnance acceptable pour le traitement (dans le respect de toutes les contraintes). Le problème peut être surcontrôlé et par conséquent l'ensemble de solutions acceptables est vide.
- Constituer des compagnes de production, c'est-à-dire une stratégie pour la minimisation des temps de montage ou des coûts de changement d'outils, Une compagne est un ensemble de produits prés ordonnancés.
- Établir une planification solide pour les événements aléatoires.

### I.10 Les éléments du problème d'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement comporte les éléments suivants : les tâches, les ressources, les contraintes et les objectifs.

#### I.10.1 Les tâches

Les tâches présentent un ensemble d'opérations et de programme qu'il est nécessité d'utiliser les ressources. [GIA 88]

Il s'agit d'une entité exprimée avec un temps, une date de début  $S_i$ , une date de fin  $C_i$  et enfin une durée d'exécution  $P_i$  appropriées et elle peut être exécutée individuellement ou collectivement, après l'exécution de la tâche et le démarrage de l'opération, elle ne peut pas être arrêtée.

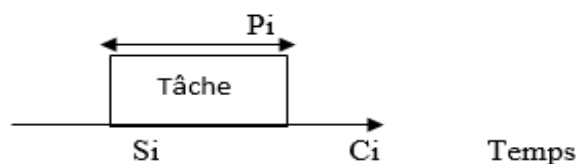


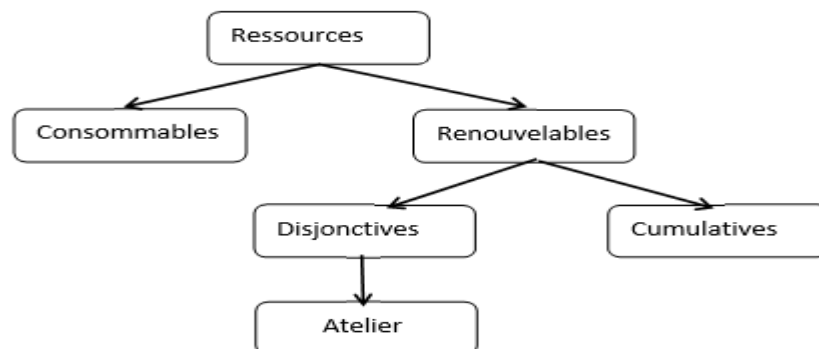
Figure 6: Les éléments de la tâche

### I.10.2 Les ressources

Une ressource est un nombre limité de moyens techniques et/ou humains prévu pour accomplir au moins une tâche, et sa capacité est notée  $A_k$ .

Il existe divers genres de ressources, ce qu'on peut classer selon leurs disponibilités au cours du temps et aussi selon leur capacité [BEN 09] :

- **Ressource renouvelable** : Après avoir alloué à une tâche, elle peut redevenir disponible à nouveau pour les tâches suivantes, donc c'est des ressources réutilisables après la fin de traitement des tâches (les machines, les hommes, l'équipement, ...).
- **Ressource consommable** : Après chaque utilisation pour l'exécution d'une ou plusieurs tâches, elle manquera de disponibilité telle que (matière première, budget).
- **Ressource disjonctive** : Considérée comme l'une des ressources renouvelables qui n'exécutent une seule tâche d'un coup (machine, robot, etc.).
- **Ressource cumulative** : c'est une ressource qui peut être utilisée en même temps par des tâches multiples (équipe d'ouvriers, poste de travail, etc.).



**Figure 7:** La Représentation typologie des différents types de ressources

### I.10.3 Les contraintes :

Les contraintes représentent des limitations de valeurs conjointes qu'au moins une variable de décision peut prendre. Il y a différentes sortes de contraintes et on a deux types habituellement rencontrés en ordonnancement, qui sont [BAP 98][BEN 09]:



Contraintes	Description	Type	Illustration
Contraintes temporelles	<ul style="list-style-type: none"> <li>La mise en œuvre d'une tâche selon le temps, c'est la date de lancement d'une tâche par la définition de la date de la disponibilité et d'échéance.</li> <li>Il s'agit d'une limite à l'exécution des tâches et dépend du temps.</li> </ul>	Contrainte de temps absolu	Cette contrainte permet d'exprimer une limite sur les valeurs possibles de la date de la tâche.
		Contrainte de temps relatif	Rapport avec la contrainte de cohérence technologique, c'est là qu'elle nous montre les respections des positionnements relatifs entre tâches.
Contraintes de ressources	Les contraintes de ressources indiquent qu'une activité nécessite un certain nombre de ressources pendant son existence.	Contrainte de capacité	Contrainte (de ressource) disjonctive : Cette contrainte impose des implémentations séparées des deux tâches.
			Contrainte (de ressource) cumulative : Pour une ressource donnée, cette contrainte interdit. Exécute un certain nombre de tâches simultanément en utilisant le nombre de ressources qui dépassent leur capacité.
		Contrainte d'affectation (cas des problèmes d'ordonnancement flexible)	Contrainte de domaine : Représente les différentes ressources candidates qui doit utiliser à l'exécution des tâches.
Contrainte de différence : L'utilisation des différentes ressources pour l'exécution d'un certain nombre de tâches.			

**Tableau 1:** les type de contraintes les plus rencontrés en ordonnancement [BAP 98][BEN 09]

#### I.10.4 Les objectifs

Les objectifs sont des critères qui doivent être améliorées en minimisant ou en maximisant une fonction objective liée au temps, aux ressources ou aux coûts

**Les Objectif liés au temps**

- La réduction du temps total d'exécution
- La minimisation du temps moyen d'achèvement,

**Les Objectif liés aux ressources**

- La minimisation de nombre de ressources qui sont nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches.

**Les Objectif liés au Coût**

- La minimisation des coûts de lancement, de production, de stockage, ou de transport.

**I.10.5 Notation**

Les notations standard pour le problème d'ordonnancement sont représentées pour la première fois par Graham et al [GRA 79], ont proposé une notation qui compose de trois champs chacun a une signification différente. Le tableau suivant résume ces notations:

Le champ	Description	Le sous champ	Description et leur valeur
$\alpha$	Définie l'environnement d'exécution.	$\alpha 1$	Type d'atelier : $\alpha 1 \in \{1 \text{ ou } \emptyset, P, Q, R, F, J, O\}$ $\alpha 1 = \emptyset$ : une machine $\alpha 1 = P$ : machines parallèles identiques $\alpha 1 = Q$ : machines parallèles uniformes $\alpha 1 = R$ : machines parallèles non-uniformes $\alpha 1 = F$ : Flow shop $\alpha 1 = J$ : Job shop $\alpha 1 = O$ : Open shop
		$\alpha 2$	Nombre des machines utilisé : $\alpha 2 \in \{\emptyset, k\}$
		$\beta 1$	Indique la possibilité de préemption des taches : $\beta 1 \in \{\emptyset, pmtn\}$

$\beta$	Concerne les caractéristiques du système (des tâches et des machines) et les types de contrainte.	$\beta_2$	Indique la présence ou non de ressource auxiliaire : $\beta_2 \in \{\emptyset, \text{res}\}$
		$\beta_3$	Indique la présence ou non de contrainte de précédence : $\beta_3 \in \{\emptyset, \text{prec, uan, tree, chain}\}$
		$\beta_4$	Décrit les dates de disponibilité des travaux: $\beta_4 \in \{\emptyset, r_i\}$
		$\beta_5$	Décrit les durées d'exécution des travaux: $\beta_5 \in \{\emptyset, p_i = p, p < p_i < p^-\}$
		$\beta_6$	Décrit les dates de sortie au plus tard des travaux: $\beta_6 \in \{\emptyset, d_i\}$
		$\beta_7$	Indique si un temps d'attente entre les différents opérations d'un travail est autorisé : $\beta_7 \in \{\emptyset, \text{no-wait}\}$
$\gamma$	Indique les critères d'optimisation et la fonction objective à minimiser ou à maximiser.	$\gamma$	$C_{\max}, C_j, w_j C_j, L_{\max}, j$

**Tableau 2:** Les notations standard pour le problème d'ordonnancement [GRA 79]

➤ **Notation de certaines configurations, caractéristiques et des critères**

<b>Configuration</b>	P	Machine parallèle identique
	Q	Machine parallèle uniforme
	R	Machine parallèle indépendante
	F	Flow shop
	O	Open shop
	J	Job shop
<b>Caractéristique</b>	pmt n	La préemption, c'est-à-dire qu'on a la capacité d'arrêter n'importe quelle tâche à n'importe quel point de travail particulier pendant son exécution, et la capacité d'effectuer la tâche à partir de ce point.
	res	L'utilisation des ressources est limitée à des unités de temps, partagées par les travaux.

	prec	Les travaux spécifiques sont exécutés d'une certaine manière en fonction de la relation de précedence entre elles. etnedécérp ehcât al euqsroL ecnemmoc ehcât ertua enu ,eénimret tse.
	ri	Les premières dates de début possibles sont déterminées pour chaque travail.
	m	Le nombre de tâches pour chaque emploi est limité par un plafond.
	p	Le temps nécessaire à la réalisation de chaque tâche est fixé ou limité par une limite inférieure et supérieure.
<b>Critère</b>	Cm ax	Fin de traitement
	Lm ax	Décalage
	Ci	Fin d'exécution d'une tache
	Tj	Retard d'une tache
	Wj	Temps d'attente

**Tableau 3:** Quelques notations en ordonnancement

### I.11 Classification des problèmes d'ordonnancement

La classification de ces problèmes dans un atelier peut se faire selon le nombre de machines et leur ordre d'utilisation pour fabriquer un produit, Un atelier est caractérisé par le nombre de machines qu'il possède et en fonction de son type.

#### I.11.1 Une seule machine

Tout simplement, le traitement d'un job se fait réaliser par une seule machine avec une seule opération.

#### I.11.2 Machine parallèle

La réalisation d'un job se fait avec une seule opération sur de n'importe laquelle des machines identiques (indistinctement) en parallèles.

#### I.11.3 Le type flow-shop

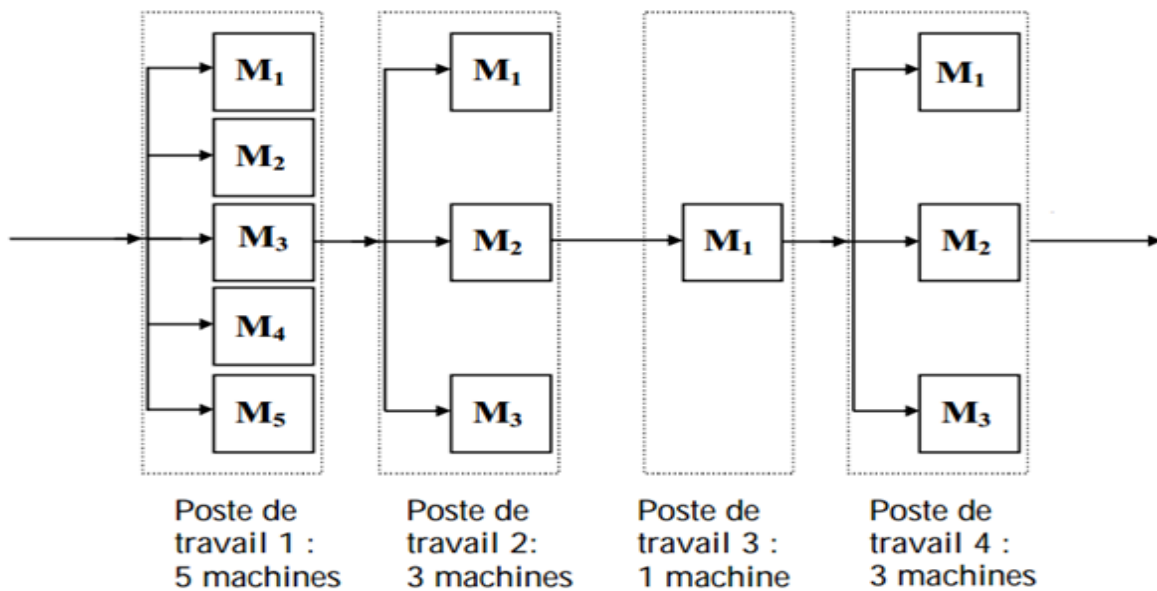
La règle de ce type « flow -shop » d'atelier est qu'il se distingue par des machines séquentielles et successives, de sorte qu'il y a une destination pour toutes les tâches sur toutes les machines dans le même ordre, c'est la seule voie.



**Figure 8:** Flow shop simple à 4 machines

#### I.11.4 Le type flow-shop hybride

Il est composé de m stages, l'étage composé de M machines, les machines existent en plusieurs exemplaire identique et parallèles avec un traitement du produit sur une seule machine de chaque étage, aussi par un même ordre des étages pour tous les produits.



**Figure 9:** Quatre Étages de travail avec des machines identique

#### I.11.5 Le type job-shop

C'est un atelier multipiste selon le type de tâche à effectuer, un ordre spécifique précis doit être attribué pour effectuer les tâches.

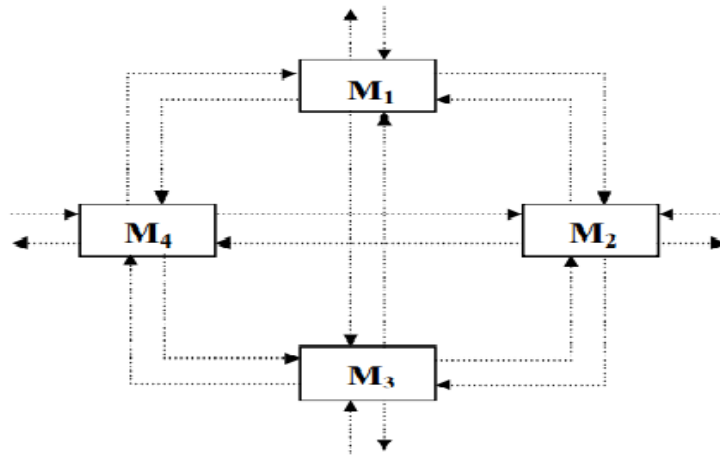


Figure 10: Job shop avec 4 machines

### I.11.6 Le type job-shop hybride

C'est le même principe avec des postes qui contiennent des M machines.

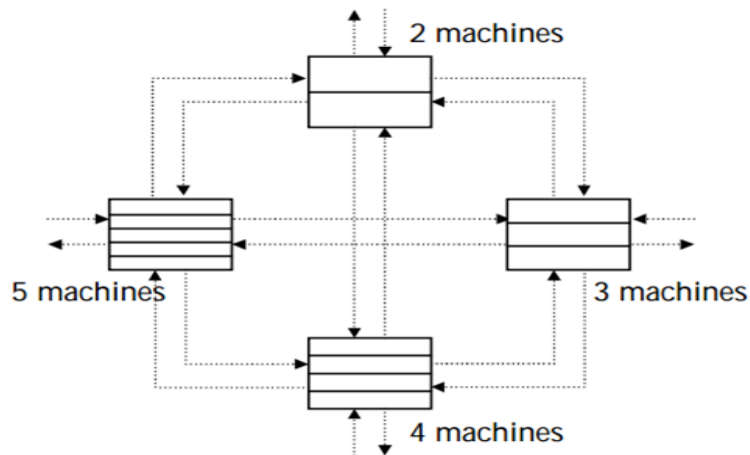


Figure 11: job shop hybride

### I.11.7 Le type open-shop

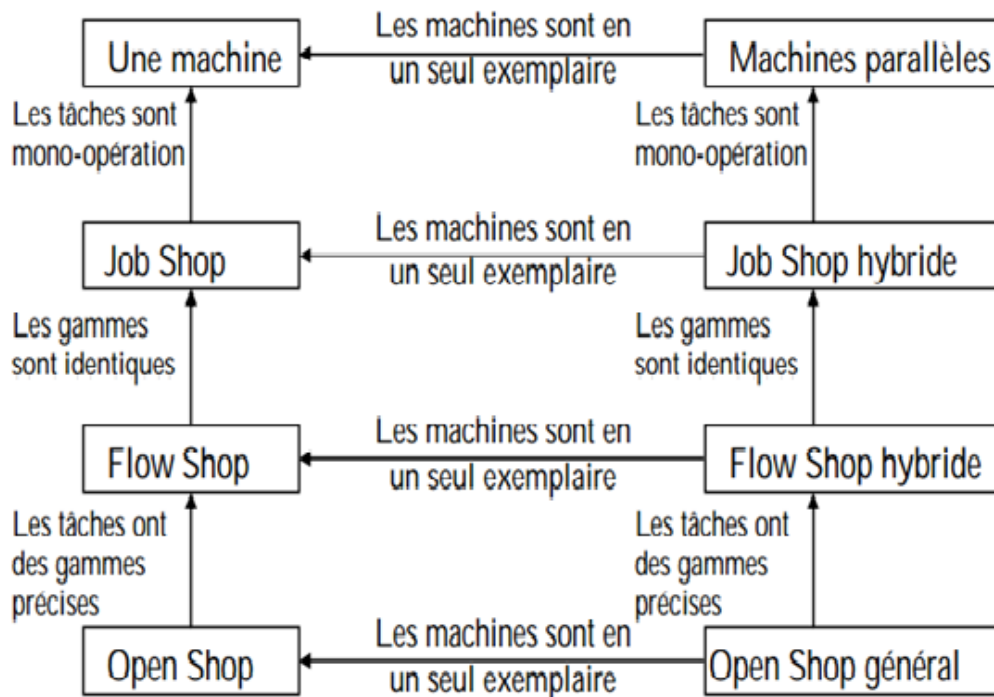
Ici dans cet atelier, les tâches s'effectuent de manière libre sans ordre ni arrangement particulier.

### I.12 Organisation d'ateliers

L'étude des relations qui existent entre différents problèmes d'ordonnancement est d'un grand intérêt, la figure ci-dessous montre ces différentes relations :

Les organisations mentionnées ne sont pas indépendantes. En fait il y a similitude, réduction et différenciation entre eux où chaque arc est interprété de B à A et que A est un cas

particulier de B en raison du cas qui lui est associé. Par exemple, Flow Shop classique est un cas particulier de Flow Shop Hybride



**Figure 12:** Relation entre les différentes organisations

### I.13 Notation de la complexité des problèmes

La théorie de la complexité a été développée pour classer les problèmes du plus facile au plus difficile (plus en plus difficile) selon l'ordre de grandeur de leur complexité par un point de vue mathématique.

Les problèmes qui n'ont pas un algorithme pour les résoudre ce sont des problèmes indéterminables ou indécidables, par contre les problèmes qu'il existe au moins un algorithme pour les résoudre ce sont des problèmes décidables. [SAK 84]

La complexité d'un problème est la complexité minimale dans le pire des cas d'un algorithme qui le résout.

Les problèmes d'ordonnancement sont des problèmes combinatoires étant NP - difficiles, ça veut dire que aucune méthode efficace qui donne nous une solution efficacement [GAR & JOH 79], et pour le résoudre il faut construire la solution que nous avons trouvé après à prouver son existence, après déterminer sa complexité parce qu'il détermine la nature de l'algorithme à implémenter.

### I.13.1 La classe NP

On distingue deux sous classe dans la classe des problèmes NP : la classe des problèmes polynomiaux (la classe P) et la classe des problèmes NP-Complets.

### I.13.2 La classe P

C'est une classe des problèmes les plus faciles, on dit un problème de classe P s'il existe un algorithme de résolution polynomial en temps.

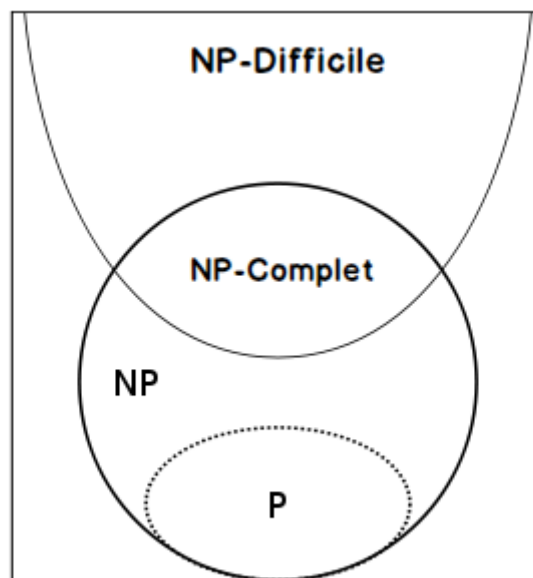
### I.13.3 La classe NP-Complet

En 1979, Garey et Johnson [GAR & JOH 79]présentent une liste des problèmes connus pour être NP-complets. Tous problèmes appartiennent de la classe NP est aussi difficile ils s'appellent NP-Complet. Avec certaines caractéristiques importantes de cette classe comme la résolution avec un algorithme polynomial n'existe pas, Bien qu'il existe des algorithmes très efficaces qui peuvent être utilisés appelés algorithmes pseudo polynomiaux.[SAD 02]

### I.13.4 La classe NP-difficile

C'est une autre classe encore plus difficile que la classe NP-Complet (NP-hard en anglais), qui représente une classe de la plupart des problèmes d'ateliers.

La classe NP-Complet est incluse dans la classe NP-difficile.



**Figure 13:** Différence entre les classes d'un problème



➤ **La classe des problèmes d'ordonnancement**

D'après les littératures en résumé le tableau suivant :

- ❖ Les problèmes  $1||\overline{Cw}et\ 1||\overline{C}$  dans la classe P [LAW & al 89].
- ❖  $1|di|\overline{U}$  dans la classe P [PIN 95].
- ❖  $1|di|\overline{T}$  et  $1|di|,\overline{Uw}1|di|\overline{T}w$  dans la classe NP-difficile [LAW & al 89]
- ❖ Machine parallèle:
  - ❖  $P||fmax$  dans la classe NP-difficile. [LAW & al 89]
  - ❖  $P||Z$  avec  $Z \in \{Cmax, Fmax, Tmax, Lmax\}$  dans la classe NP-difficile. [BRU 04]
- Les problèmes Job shop sont NP-difficile [JAC 56]
- Les problèmes flow shop hybride sont NP-difficile [GUP 88]
- Les problèmes Job shop flexible sont NP-difficile [BRU 90]
- Les problèmes de type flow shop, job shop et open shop sont NP-difficile. [TAN & al 94]

Critère et/ou problème		Cmax	Fmax	Tmax	Lmax	fmax	$\overline{C}$	$\overline{Cw}$	$\overline{T}$	$\overline{T w}$	$\overline{U}$	$\overline{U w}$
Une seule machine		P	P	P	P	P	P	P	NP	NP	P	NP
Machine parallèle	(p)	NP	NP	NP	NP	NP	P	NP	NP	NP	NP	NP
	(Q)	NP	NP	NP	NP	NP	P	NP	NP	NP	NP	NP
	(R)	NP	NP	NP	NP	NP	P	NP	NP	NP	NP	NP
Flow shop		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Flow shop hybride		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Job shop		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Job shop flexible		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Open shop		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP

**Tableau 4:** Classe de complexité de problème d'ordonnancement

○ **Notation :** P : la classe P

NP : la classe NP-difficile

Il existe des cas particuliers pour certains problèmes d'ordonnancement qu'ils peuvent être résolus par des algorithmes polynomiaux optimaux, comme les suites ;

- $1|ri, pmtn|C_i$  résolu par la règle SRPT (Shortest Remaining Processing Time) [BAK 74]

- $P_m||C_i$  résolu par la règle SPT (Shortest Processing Time) [CON & al 67]

- $F2||C_{max}$  résolu par l'algorithme de Johnson [JOH 54]

- $O2||C_{max}$  résolu par l'algorithme de Gonzalez et Sahni [GON & SAH 76]

- $J2||C_{max}$  résolu par l'algorithme de Jackson [JAC 56]

#### **I.14 État de L'art**

Dans ce chapitre, nous rangeons un état de l'art comporte une description de la plupart des importantes taches de recherches effectués sur les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement

Méthode	Année	Auteur	Atelier	Description de la méthode	Fonction objectif
Modèle de programmation mathématique Algorithme	2012	Javadian, N., Fattahi, P., Farahmand-Mehr, M., Amiri-Aref, M., Kazemi, M.,	Flow shop hybride	Un algorithme méta-heuristique basé sur l'algorithme immunitaire est développé.	Minimisation Makespan
La décomposition approcher	2014	Liu, Y. and Feng, Z.	Flow shop	La décomposition du modèle en deux sous problèmes et en particulier, la transformation de deuxième sous problème en le minimum du problème d'appariement optimal du graphe bipartite (NP-difficile) et après la résolution avec l'algorithme classique KM (Kuhn-Munkres).	Minimisation des différents coût
Hybride approche ( Algorithme Génétique & recherche de voisinage variable )	2011	Behnamian, J. and Fatemi Ghomi,	Flow shop hybride	L'approche hybride proposée est robuste, rapide et simplement structurée, Et la comparaison montre que la proposition est très efficace pour différentes instances de structure.	Minimiser les coûts de fabrication et d'allocation totale des ressources
Algorithme hybride GSA & RT (Algorithme de recherche gravitationnelle & recherche tabou )	2018	Jun, P., Xinbao, L., Baoyu, L., Pardalos, P.M., and Min, K.	Une seule machine	Considérer la minimisation du Makespan comme l'objectif de problème sous la contrainte que la consommation totale des ressource ne dépasse pas un donnée limité	Makespan
Algorithme hybride SA & OEP (un algorithme Particle Swarm Optimization (OEP) & Recuit simulé )	2011	Li, K., Shi, Y., Yang, S., and Cheng, B.	Parallèle machine	Les auteurs démontrent que l'algorithme hybride SA-OEP surpasse le OEP, en particulier pour les problèmes de test de grande taille.	Makespan
Une combinaison linéaire	2013	Wang, X. and Wang, J	Une seule machine	Intéressant d'explorer des modèles d'ordonnancement plus généraux avec un effet d'apprentissage, des tâches détériorées et des temps de traitement convexes dépendant	minimiser une fonction de coût contenant la durée totale d'achèvement et le coût total

				des ressources, pour considérer différents problèmes d'attribution de date d'échéance	des ressources.
Algorithme hybride OEP&SA (un algorithme Particle Swarm Optimization (OEP) & Recuit simulé )	2005	WeijunXia et ZhimingWu	Job Shop flexible	OEP pour la résolution du sousproblème d'affectation et le recuit simuléen tant qu'algorithme de recherche locale utilise une certaine probabilité pour éviter d'être piégé dans un optimum local, pour la résolution du sous-problème d'ordonnancement	Makespan
Un modèle mathématique et des approches heuristiques ( une hybridation de deux méthodes : une méthode de recherche tabou (RT) et un recuit simulé (SA) )	2007	Parviz Fattahi, Mohammad Saidi Mehrabad & Fariborz Jolai Journal of Intelligent Manufacturing	Job Shop flexible	Le modèle mathématique est utilisé pour obtenir une solution optimale pour les problèmes de petite taille. Le développement de six algorithmes différents basés sur la combinaison des deux méthodes et des deux approches: intégrée et Hiérarchique. Après la comparaison : la recherche tabou et l'heuristique de recuit simulé pour les problèmes d'affectation et de séquençage consécutivement est plus approprié que les autres algorithmes.	La raison de la complexité de calcul élevée. Pour résoudre le cas réaliste avec plus de deux emplois

**Tableau 5:** Etat de l'art

### I.15 Conclusion

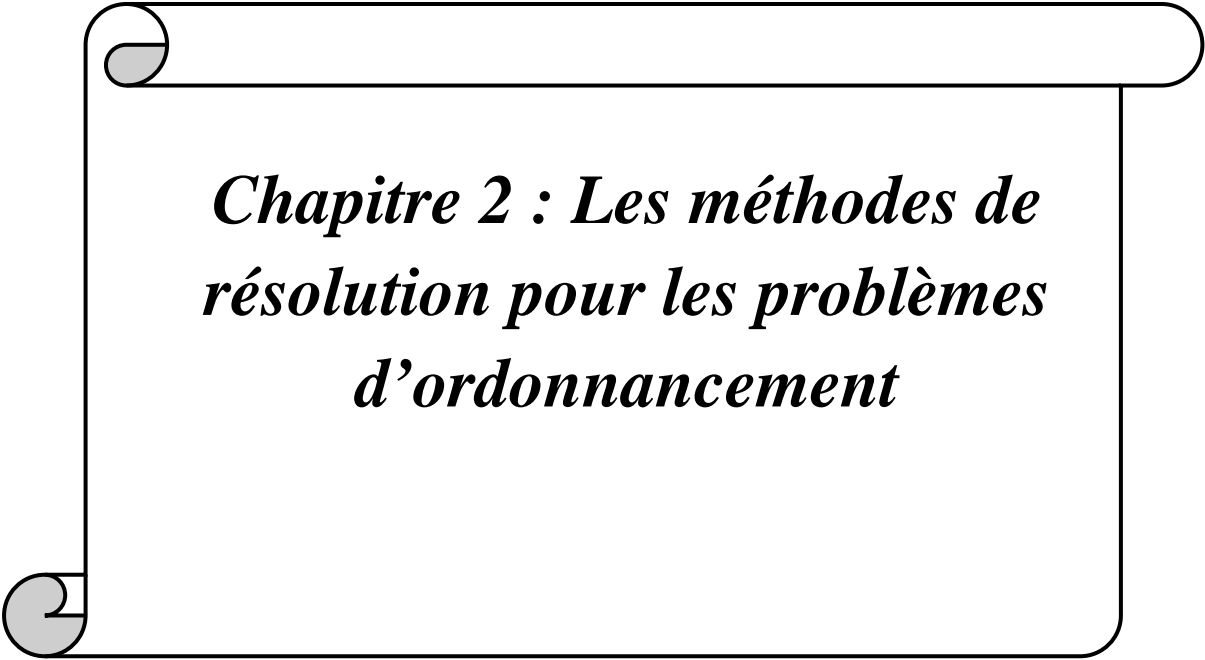
Ce chapitre a pour objectif principal de présenter rapidement les diverses définitions relatives au système de production et à leur gestion., Il s'agit d'expliquer plus précisément

## Chapitre 01 : L'ordonnancement dans les systèmes de production

l'ordonnancement, qui peut être pensé comme un moyen de décision et d'action, en présentant ses différents concepts et sa notation en triplets.

Nous avons mentionné les différents types d'ateliers disponibles, et on a ajouté les différentes classes des problèmes, de sorte que chaque classe nécessite un type de famille de résolution.

Enfin un état de l'art pour donner une vue d'ensemble et complète des différentes approches de solutions qui ont été développées récemment pour montrer les solutions la plus réussie à divers problèmes.



***Chapitre 2 : Les méthodes de  
résolution pour les problèmes  
d'ordonnancement***

## II.1 Introduction

Dans plusieurs domaines, des problèmes d'optimisations sont rencontrés, ce qui nécessite de trouver des solutions de plusieurs manières. L'optimisation combinatoire réduit ou maximise les fonctions dans les systèmes comportant un grand nombre de paramètres. Dans ce cadre, et pour les problèmes difficiles, on s'orientera vers des méthodes approchées, qui visent à donner une solution avec une valeur approchée de la solution optimale, par opposition aux méthodes exactes avec lesquelles on ne peut parvenir à des solutions face à ce type de difficulté du problème.

Ce chapitre contiendra des définitions et des règles pour des méthodes exactes et approchées et enfin expliquera le travail des algorithmes à utiliser dans le chapitre trois pour résoudre notre problème.

## II.2 Les méthodes de résolution

Pour trouver une solution à un problème d'ordonnancement, nous avons différentes méthodes d'optimisation, il est possible de les diviser en deux groupes principaux. : les méthodes exactes et les méthodes approchées.

D'ailleurs, la résolution d'un problème d'ordonnancement ne se limite pas seulement une méthode mais plutôt à des méthodes plus efficaces qui incluent la combinaison de deux types de méthodes dans ce qu'on appelle les méthodes hybrides.

On distingue aussi d'autres méthodes telles que les méthodes de relaxations et les schémas d'approximations pour résoudre un problème d'ordonnancement de la classe NP-difficile.

### II.2.1 Méthodes exactes

L'usage de la méthode exacte réside dans le fait que la solution optimale pour le problème considéré est atteinte de manière fiable. En fait, vous pouvez parcourir tout l'espace de recherche pour vous assurer d'obtenir toutes les solutions possibles supérieures que les meilleures trouvées lors de votre recherche. Cependant, la méthode exacte est bien connue dans la mesure où elle nécessite souvent un effort de recherche exorbitant par rapport aux ressources nécessaires. En effet, le temps de recherche et/ou l'espace mémoire nécessaire pour obtenir la solution optimale par la méthode exacte est souvent trop important, surtout pour les gros problèmes.

Par conséquent, la complexité de ces algorithmes augmente avec la taille des instances traitées.

Certaines méthodes de résolution classiques sont présentées :

### **II.2.1.3 L'algorithme de séparation et évaluation (Branch and Bound)**

Expliqué par Land et al. [LAN & DOI 60] et il s'appuie sur une méthode arborescente permettant de trouver la solution optimale. L'ensemble de solutions est défini par un arbre d'état constitué de nœuds et part.

La Méthode de séparation et d'évaluation Branch Bound (B & B ou PSE) est considérée comme l'une des méthodes les plus reconnues et les plus précises pour le problème d'optimisation combinatoire optimale. Elle repose sur une liste implicite et intelligente d'ensembles de solutions., mais vous pouvez éviter d'énumérer de grandes classes qui ne contiennent pas la solution optimale en analysant les propriétés du problème. Le terme est répertorié uniquement comme une solution potentiellement bonne.

Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Dantzig et al. Pour résoudre [DAN & SEL 54] les problèmes de voyageur de commerce. Une séparation et une évaluation sont proposées pour d'éventuels problèmes de planification [CAR & REB 96][MAH & ROS 14].

### **II.2.1.2 La programmation dynamique**

La programmation dynamique est considérée comme une approche de conception, Un moyen robuste de résoudre avec précision les problèmes d'optimisation combinatoire. La fonction objective a une propriété appelée décomposabilité [MIC 83]. Repose sur l'espèce d'optimalité affirmation par Bellman [BEL 54].

Un algorithme de programmation dynamique comporte quatre pas consécutifs. [COR & al 10] :

(i) La détermination de sous-problèmes dont les solutions optimales vont permettre de recomposer un résultat idéal du problème initial ;

(ii) En partant de la valeur de la solution optimale du sous-problème, on détermine itérativement la valeur de la solution optimale ;

(iii) La valeur de la solution optimale est calculée à la hausse ;

(iv) La reconstitution du résultat optimale, en fonction des valeurs calculées lors de l'étape précédente.

### **II.2.1.3 La programmation linéaire**

La programmation linéaire (LP) [HER 15] est l'une des méthodes les plus puissantes de la recherche opérationnelle. Elle est basée sur une modélisation mathématique du problème. Pour son utilisation, Le problème posé peut être ramené à la programmation linéaire, cette dernière consistant en une programmation linéaire fonctions linéaires optimisées (maximisées ou



minimisées) qui expliquent le but du problème, et Un ensemble d'équations linéaires et/ou d'inégalités qui représentent les contraintes imposées par problème.

S'applique aux problèmes d'optimisation sous contrainte ici, la fonction objective et les contraintes sont toutes linéaires par rapport à la variable prise de décision inconnue diverses variantes de programmation linéaire.

Ces méthodes exactes sont souvent utilisées afin de pouvoir évaluer beaucoup plus rapidement les erreurs commises par les approches qui permettent de résoudre les problèmes en cause. [HER 15]

### II.2.2 Méthodes approchées

Les espaces de recherche sur lesquels nous nous appuyons pour trouver des solutions à un problème sont souvent vastes et multidimensionnels. L'utilisation de méthodes d'optimisation vise donc à surmonter les solutions minimales locales et à pénétrer d'avantage dans des endroits prometteurs pour trouver les soi-disant minimums globaux. Ils sont plus pratiques pour résoudre des problèmes difficiles ou des problèmes dont les solutions sont cherchées dans un court délai. On distingue des méthodes heuristiques qui se divise en trois familles différentes : des heuristiques constructives, des heuristiques d'améliorations et des métaheuristique.

#### II.2.2.1 Méthode heuristique

Il y a des problèmes que l'on ne peut pas résoudre par des méthodes exactes, on en arrive donc à d'autres méthodes, ou les méthodes dites approchées, qui constituent une méthode particulièrement efficace pour traiter les problèmes d'ordonnancement.

Les heuristiques permettent de fournir une solution acceptable au problème dans les plus brefs délais. Sans possibilités pour assurer la meilleure solution obtenue d'après les littératures on a plusieurs définitions pour les heuristiques, parmi lesquelles :

Nous l'exprimons et disons que c'est l'une des règles de base ou une stratégie utilisée qui permettra d'atteindre des solutions à la lumière de problèmes complexes et importants pour donner des solutions plus approximatives. [NEW 80]

Les différentes familles des méthodes heuristiques :

#### ➤ Les heuristiques constructifs

En général, il est connu pour être relativement rapide et simple, s'appuyant sur l'itération pour trouver des solutions à partir des données initiales, pour atteindre une solution complète,

grâce à la réalisation d'une solution partielle à chaque itération. D'un autre côté, la qualité des solutions est restreinte, étant donné que l'ordonnancement ne s'établit pas étape par étape, sans optimisation globale [HER 15].

### ➤ **Les heuristiques d'amélioration**

L'heuristique d'amélioration commence avec une solution permise déjà construite et modifiable afin d'améliorer la valeur de la fonction objective [ROU 11]. Construire la solution initiale avec une heuristique constructive, Ce sera la base d'un processus itératif basé sur la formulation d'une solution complète en la remplaçant par l'un des voisins avec la meilleure valeur de la fonction objectif. Ce type d'opération nécessite un critère d'arrêt obligatoire. [HER 15]

### **II.2.2.2 Les métaheuristiques**

Les métaheuristiques est un travail répétitif distinctif avec un critère d'arrêt par étapes, consistant d'abord en une étape initiale basée principalement sur la recherche aléatoire, c'est un calibre d'un groupe d'algorithmes qui travaille sur la recherche rapide dans le domaine des solutions et sont connus pour leur rapidité et leur supériorité dans la résolution de problèmes d'optimisations importantes ou insolubles et c'était pour la première fois en 1980.

Les métaheuristiques peuvent être utilisées pour de nombreux types de problèmes, tout en étant plus complètes.

C'est une heuristique générique qui peut être décrit de manière abstraite et adapté à différents types de problèmes avec quelques modifications, nombreuses métaheuristiques reposent sur des fonctions inspirées par des systèmes naturels que l'on trouve dans différents domaines, la biologie (Algorithme génétique) et la physique (Le recuit simulé), Sauf la méthode Tabou, pas inspirée par les phénomènes naturels. [HER 15]

La métaheuristique est facile à adapter sans changements majeurs à son algorithme sous-jacent. Elles sont d'une efficacité relativement imprévisible. Elles ne garantissent pas de trouver la solution optimale, elle se base sur un principe stochastique pour atteindre son but.

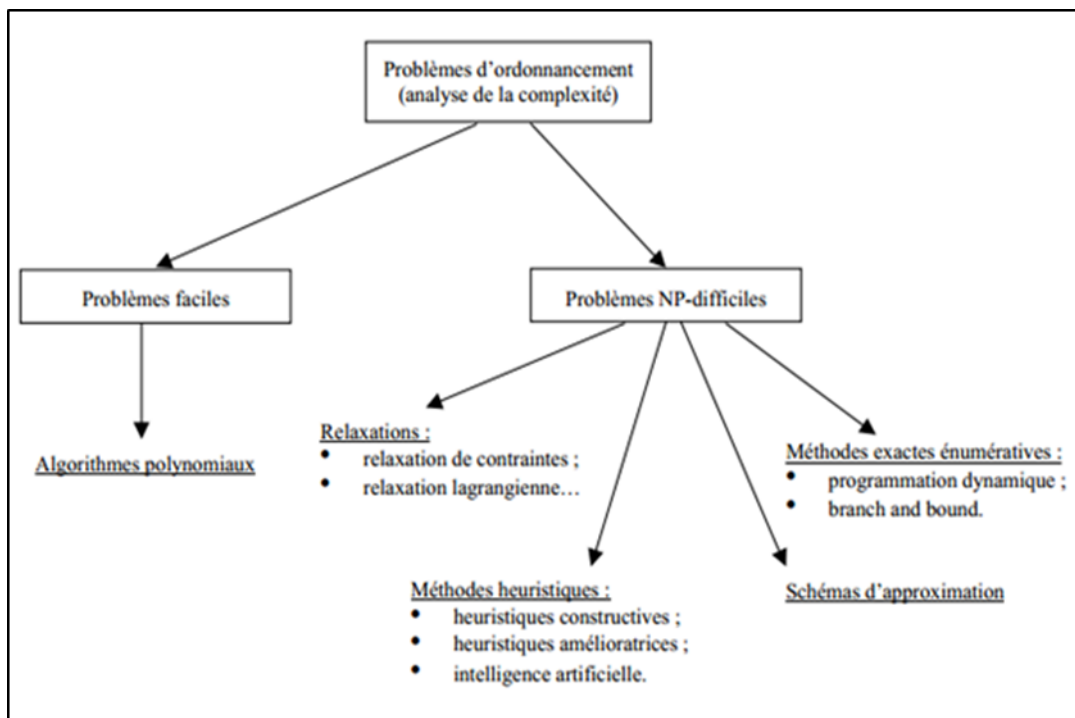
➤ **Les méthodes de relaxation**

Cette méthode permet d'obtenir une valeur borne inférieure ou supérieure du coût optimal. D'après la production d'une solution approximative au problème posé, elles sont généralement conçues de manière que la solution obtenue (en matière de coût) puisse être positionnée par rapport à la valeur optimale. [DUV 00]

**II.2.3 Les méthodes hybride**

Se compose de plusieurs méthodes dans les catégories ci-dessus ou de méthodes spécifiques qui n'entrent pas dans ces catégories.

La figure suivante représente diverses méthodes de résolution de problèmes de la classe facile et NP-difficiles :



**Figure 14:** Analyse d'un problème d'ordonnancement

**II.2.3.1 L'hybridation**

Résoudre le problème général d'ordonnancement dans les ateliers de flow shop hybride complexe en construisant un métaheuristique hybride séquentiel et un métaheuristique hybride synchrone parallèle basé sur des pondérations de fonction objective : un algorithme génétique utilisant la recherche tabou, un algorithme génétique qui utilise le recuit simulé et un algorithme génétique. Ensuite, afin de déterminer la méthode et le type d'hybridation qui apporte la

meilleure solution pour un ordonnancement, les résultats de chaque hybridation seront réalisés d'une part, et entre les résultats des deux hybridations seront réalisés d'autre part.

L'hybridation est une combinaison de plusieurs méthodes pour avoir une méthode plus efficace. L'objectif est de résumer les avantages des processus hétérogènes. Une méthode méta heuristique hybride est une méthode composée de deux méthodes, dont au moins une est une métaheuristique.

C'est en profitant de certains de chacun méthode en combinant des algorithmes selon une approche synergétique [GUN 06]. Il est possible d'hybrider toutes les méthodes, y compris heuristiques et méthodes exactes.

Les méthodes hybrides se divisent en deux groupes : les métaheuristiques hybrides, qui combinent plusieurs méta- heuristiques, et les méthodes hybrides, qui combinent des méthodes exactes et des méta- heuristiques.

#### ➤ **Hybridation entre métaheuristiques**

Selon Talbi [TAL 02]Hybridation entre métaheuristiques Elle repose sur deux critères : l'ordre des passages (séquentiel ou parallèle) et la synchronisation des hybridations parallèles. Par conséquent, plusieurs classifications existent où chacune se base sur différents critères. Il existe deux visions de classification : la classification hiérarchique et la classification plate.[TAL 02]

#### **II.2.3.2 Une classification hiérarchique**

Une taxinomie hiérarchique qui aide à comprendre et à déterminer la structure générale de l'hybridation.

Une grammaire a été introduite pour permettre une description précise des différents schémas d'hybridation. Une autre classification est utilisée qui se concentre sur des hybrides exacts de méthodes d'approximation par Puchinger et al. [JAK & GUN 05]

L'hybridation peut être réalisée de plusieurs manières (figure 15) et comme la suite [DUV 00] :

#### ➤ **Hybridation séquentielle**

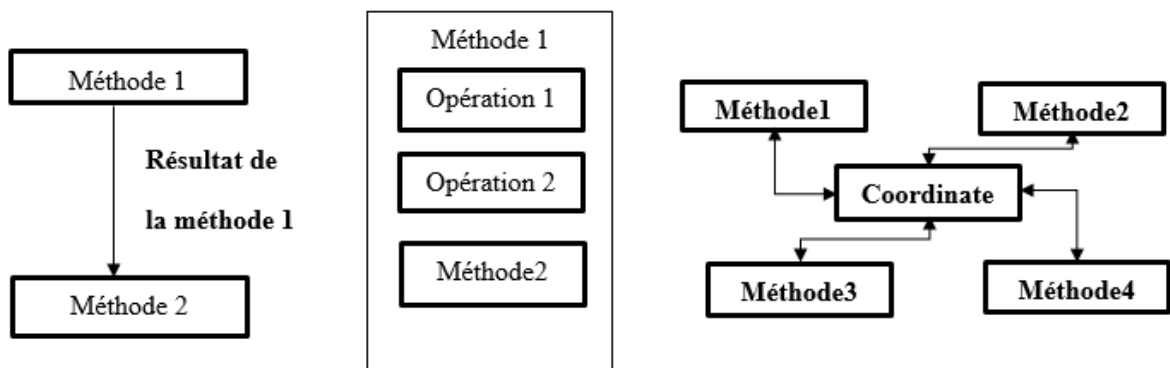
C'est le type d'hybridation le plus simple. Consiste en l'exécution séquentielle de diverses méthodes de recherche, les résultats de la méthode pour agir comme une solution initiale à la suivante.

➤ **Hybridation parallèle asynchrone**

Consiste à développer plusieurs méthodes en parallèle. Cette coévolution nécessite un mécanisme et un coordinateur qui s'assure que les méthodes fonctionnent bien ensemble, bien entendu, il est possible de combiner plusieurs stratégies d'hybridation en son sein de la même façon.

➤ **Hybridation parallèle synchrone**

Elle est réalisée en incorporant des méthodes de recherche surtout avec l'opérateur. C'est plus compliqué à formuler et il est plus implémenté que le précédent.



**Figure 15:** Différentes stratégies d'hybridation [DUV 00]

### II.3 La méthode adaptée

Une idée pratique consiste à rechercher une solution quasi optimale dans un délai raisonnable. Par conséquent, la tendance à résoudre les problèmes d'ordonnancement HFS avec l'heuristique et les métaheuristique, notamment un métaheuristique, est de plus en plus.

Pour trouver l'optimum global, tout algorithme d'optimisation doit utiliser la stratégie de l'exploration et la stratégie de l'exploitation l'exploration pour la recherche de zones inexplorées dans l'espace de recherche et l'exploitation pour exploiter des connaissances acquises aux points déjà visités pour trouver de meilleurs points.

La métaheuristique est une famille de méthodes stochastiques pour résoudre les problèmes d'optimisation.

Plusieurs méthodes métaheuristicques ou hybrides ont déjà été proposées pour résoudre des problèmes d'ordonnancement. Nous travaillons à proposer une méthode basée sur combiner la recherche tabou et les essais particulières.

### II.3.1 La recherche taboue

La méthode de recherche Tabou est une métaheuristique que Glover a développé en 1986. Depuis lors, la méthode est devenue très populaire et spécifiquement pour des problèmes d'optimisation combinatoire, grâce à son succès dans la résolution de nombreux problèmes très vastes et complexes (souvent NP-difficile).

#### II.3.1.1 Principe

La recherche tabou possède une solide approche interne de l'amélioration des processus. L'implémentation des divers paramètres nécessaires à l'application de cette méthode sont :

- La création d'une solution de départ,
- Structure de voisinage et déplacements,
- La mémoire tabou,
- Critère d'aspiration,
- Critère d'arrêt,

#### II.3.1.2 Définition (Liste tabou) :

Est une structure de données dans laquelle sont mémorisées les  $k$  mouvements inverses des  $k$  dernières mouvements effectués.  $K$  est la taille de liste tabou. [DUV 00]

#### II.3.1.3 Définition (mouvement tabou) :

Un mouvement tabou est un mouvement inverse mémorisé dans la liste tabou. [DUV 00]

Pour le passage d'une solution à une autre, La recherche tabou doit utiliser des opérations itératives successives, avec une liste tabou pour empêcher le risque de revenir à une configuration précédemment consultée, afin d'en orienter le déroulement future pour améliorer la meilleure solution.

Le mouvement aléatoire qui permet de passer d'une solution à une autre solution proche après certaines modifications de la structure de la solution, ce procédé s'appelle voisinage.

Pour un point  $X$ , le voisinage par un mouvement aléatoire faisable noté  $Y$ , la taille du voisinage est le nombre de points  $Y$  générés dans le voisinage de  $X$ . Donc le point  $X$  et par un déplacement par l'exploration itérative de l'espace de solution vers une solution  $Y$  qui en noté comme un voisinage.

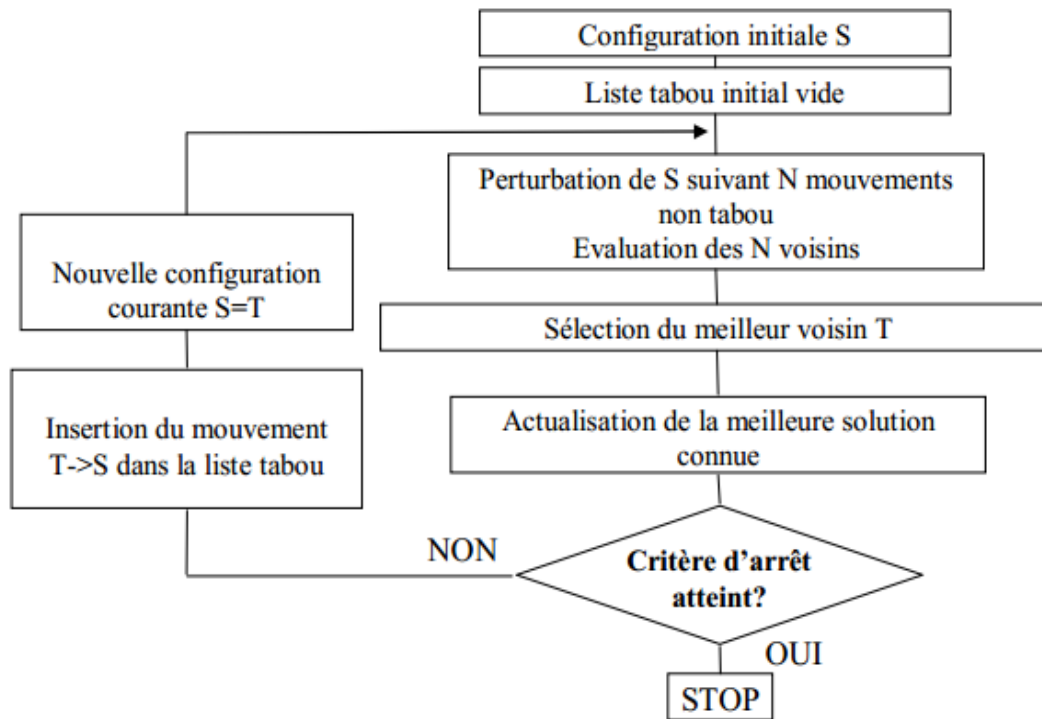


Figure 16: L'organigramme de la recherche tabou

#### II.3.1.4 Quelque problème d'application de la recherche tabou

- Ordonnement, planification, production
- Ordonnement d'instruction, micro-code
- Constitution et ordonnement de trains
- Problème de voyageur de commerce

#### II.3.2 L'optimisation par essaim particulaire

En 1995, il a été proposé l'optimisation par essaim particulaire (OEP) par Eberhart et Kennedy aux États-Unis d'Amérique, et il se compose principalement d'essaims contenant des particules qui suivent parfaitement le comportement des volées d'oiseaux, Elle est considérée comme l'un des différents types de métaheuristique dans laquelle elle revêt une importance particulière dans son mode d'action, ce qui permettra d'atteindre les solutions possibles dans un délai raisonnable.

Un OEP, inspiré d'après un comportement naturel ou bien socio-psychologique.

### II.3.2.1 Principe

Après avoir activé l'algorithme, un essaim aléatoire est lancé dans l'espace de recherche. Nous savons que l'essaim est constitué d'un groupe de particules caractérisé par une vitesse et une position, la particule est la base de cet algorithme, de sorte qu'à partir de là, nous atteignons la meilleure solution en étant capable de déplacer ces particules vers d'autres endroits et en le gardant et au mieux de ce qu'il a atteint, a également distingué cette particule en étant capable d'obtenir les meilleures performances après avoir interrogé ses voisins.

Un OEP, basé sur le déplacement de particule sur l'espace de recherche pour trouver l'optimum global, Les trois composantes suivantes ont une incidence sur le mouvement d'une particule est comme le suite [COO & al 08] [HAC 13]:

les particules se déplacent selon les équations (1) et (2)

$$V(t+1) = V(t) + C1r1(Pb(t) - X(t)) + C2r2(Pg(t) - X(t)) \quad (1)$$

$$X(t+1) = X(t) + V(t+1) \quad (2)$$

Avec :

C1 et C2 représentent les coefficients d'accélération

r1 et r2 deux nombre aléatoire entre le 0 et 1

X représente la position d'une particule

V représente la vitesse d'une particule

Pbreprésente la position de la meilleure solution à travers la particule

Pg représente emplacement de la solution la plus connue à travers l'essaim

Un OEP, basé sur le déplacement de particule pour trouver la bonne solution, Les trois composantes suivantes ont une incidence sur le mouvement d'une particule est comme la suite [COO & al 08] [HAC 13] :

- **Une composante physique:**La particule se déplace où son désir est dans la direction du mouvement ;

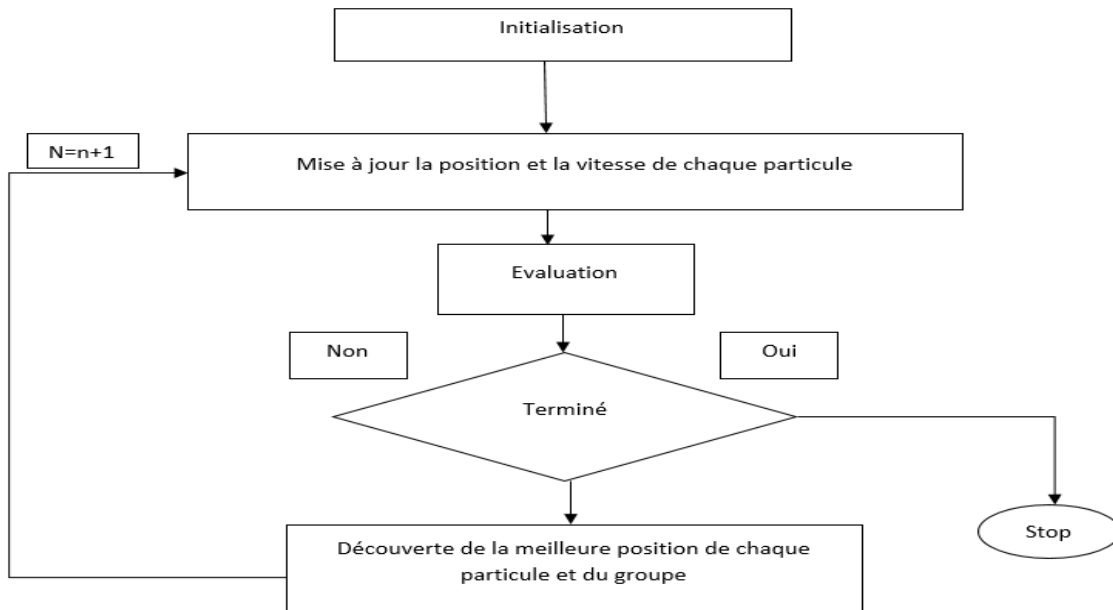
- **Une composante cognitive:**Le mouvement de la particule passera par plusieurs endroits, et à partir d'elle sera son choix et son désir de se déplacer vers le meilleur endroit qu'elle a traversé précédemment.



- **Une composante sociale** : La particule aura un désir d'aller au meilleur endroit atteint par ses voisins.

Lorsque les particules sont déplacées conformément aux itérations de l'algorithme, les nouvelles positions sont évaluées.

L'organigramme de l'algorithme de OEP sont présentées dans la figure ci-dessous :



**Figure 17:** L'organigramme de l'algorithme de OEP

#### II.4 Le choix de l'hybridation

Dans l'approche proposée dans un environnement flow shop hybride :

OEP fonctionne bien dans la recherche globale mais moins bien dans la recherche locale, d'un autre côté, RT fonctionne bien dans la recherche locale mais moins bien dans la recherche globale, Notre idée est donc de combiner les deux algorithmes de façon à ce que le nouvel algorithme hybride fasse à la fois une recherche globale et une recherche locale à chaque itération. [ZHA 11]

D'après aussi le tableau suivant on va assurer notre choix de l'adaptation :

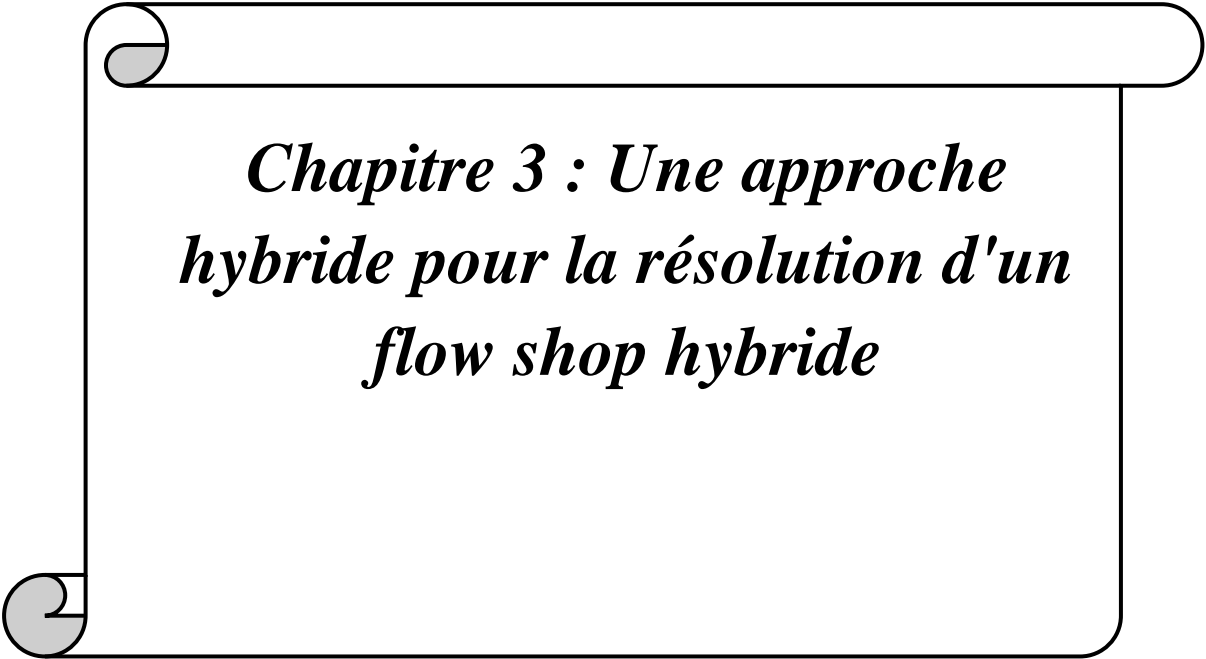
Méthode	Dérivées	Convergence	Positives	Négatives
OEP	heuristique	Aléatoire	Rapide	–
RT	heuristique	Aucune démonstration de la convergence	Grande efficacité : tabou bat tout.	Demande en ressources importantes si la liste destabousest trop imposante.

**Tableau 6:** Brève introduction à nos algorithmes

## II.5 Conclusion

Nous avons également expliqué les méthodes de résolution comme c'est le tournant du problème vers des solutions qui diffèrent d'une méthode à l'autre.

La métaheuristique est une famille de méthodes stochastiques permet de la résolution d'un grand nombre de problèmes complexes par la recherche de solutions optimales basée sur des solutions aléatoires. Pour cela on a choisi l'optimisation par essaim de particule grâce à sa rapidité de la recherche pour trouver l'optimum global avec la recherche tabou qui a une grande efficacité à la recherche locale.



*Chapitre 3 : Une approche  
hybride pour la résolution d'un  
flow shop hybride*

### III.1 Introduction

À fin de mener à bien le projet, la résolution d'un problème d'ordonnancement consiste à déterminer la séquence des opérations en affectant les ressources disponibles aux jobs appropriés.

Dans le présent chapitre nous mettons l'accent sur la résolution du problème d'ordonnancement de type flow shop hybride, à partir de la définition détaillée de ce problème ensuite nous allons présenter notre problématique.

Nous allons d'abord spécifier les caractéristiques du problème de flow shop hybride, ensuite nous présentons une modélisation mathématique et une résolution pour trouver une solution initiale à l'aide d'une règle de priorité SPT pour notre méthode proposée.

### III.2. Notations

Dans cette partie, nous présentons quelques-unes des notations que nous adoptons dans la suite de ce manuscrit (Tableau 7) :

$n$	: Nombre de jobs.
$m$	: Nombre de machines.
$J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$	: Ensemble des travaux ou jobs à réaliser.
$M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$	: Ensemble des machines.
$n_i$	: Nombre d'opérations du job $J_i$ .
$O_{ij}$	: $j^{eme}$ opération du job $i$ .
$P_{ij}$	: Durée d'exécution de l'opération $O_{ij}$ .
$M_{ij}$	: Machine sur laquelle l'opération $O_{ij}$ est exécutée.
$O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ini}\}$	: Gamme opératoire du job $J_i$ .
$S_{ij}$	: Date de début de l'opération $O_{ij}$ .
$C_{ij}$	: Date de fin de l'opération $O_{ij}$ .
$C_i$	: Date de fin de job $J_i$ .
$C_{max} = \max \{C_i, i = 1, \dots, n\}$	: Makespan ou date de fin de tous les jobs

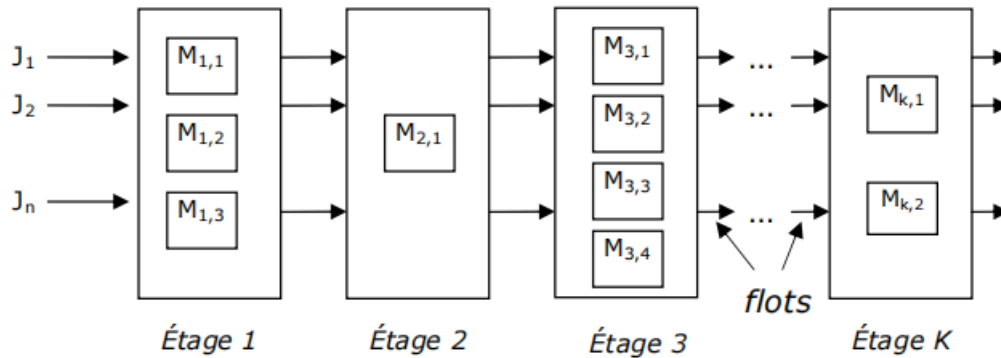
**Tableau 7:** Des notations utilisés dans la modélisation de notre atelier HFSP

### III.3 Les modèles du Flow-Shop hybride

Le Flow Shop hybride est une extension du Flow Shop classique, c'est les cas par exemple de l'industrie du verre, industrie textile et l'industrie chimique.

### III.3.1 Présentation

Un hybride flow shop est constitué d'une série d'étapes de fabrication, dont chacune inclut plusieurs machines parallèles, quelques étapes peuvent avoir seulement une machine, mais au moins une étape devrait avoir des machines multiples. L'écoulement des tâches dans la série d'étape de fabrication n'a qu'un sens.



**Figure 18:** Exemple de flow shop hybride à k étages et n jobs

D'après la figure :

Le problème de Flow Shop hybride est officiellement défini comme un :

- ✧ Un ensemble  $J=\{1,2,\dots,n\}$  de n jobs.
- ✧ Un ensemble  $E=\{1,2,\dots,k\}$  de k étages.
- ✧ Chaque étages  $E_i$  comporte  $m_i$  machine parallèles identiques, avec  $(i=1, 2,,k)$ .
- ✧ Une durée du traitement  $P_{ij}$  pour chaque job j qui doit être traité sur une seule machine de chaque étage  $E_i$ , avec une continuité.
- ✧ Le même écoulement des jobs j dans les k étages, c'est le même ordre pour tous les jobs.
- ✧ Il est obligé de minimiser la durée totale d'exécution par trouver fournir un ordre de séquençement faisable.
- ✧ Le problème de Flow Shop hybride est NP-difficile Gupta [GUP 88]. D'après la notation triple  $\alpha/\beta/\delta$ elles sont insuffisantes pour prendre en compte un problème de modèle Flow Shop hybride [Vingier 97], le champ  $\alpha$ est le seul qui va avec la description physique du modèle de Flow Shop hybride, tel que les quatre paramètres de  $\alpha$ [GOU 03] :

$\alpha_1$  = indique qu'il s'agit d'un Flow Shop hybride

$\alpha_2$  = indique le nombre d'étages E

$\alpha_3 \in \{\emptyset, P, Q, R\}$

$\alpha_4$  = indique le nombre de machine m de l'étage E

Ce problème d'ordonnancement décrit est noté : [TOT 20]

$$FH_m, \left( (RM^{(k)})_{i=1}^m \right) | M_j, S_{sd} | \sum T_j, TST$$

Avec :

FH<sub>m</sub>, indique un HFS à m étages ; représente que chaque étape se compose de plusieurs machines non liées.

M<sub>j</sub> représente l'éligibilité de la machine.

$\sum T_j, TST$  indique le retard total et l'objectif de temps de réglage total.

✧ Entre les étages i et i + 1, la capacité tampon est supposé infinie ;

✧ Une fois le job terminé à l'étage i, celui-ci peut être traité comme suit :

1. Les jobs seront immédiatement livrés à l'étage suivante dès qu'une des machines de l'étape i + 1 sera disponible ;

2. Si aucune machine n'est disponible au l'étage i + 1, le job sera stocké dans le tampon suivant compte tenu de l'infini espace tampon ;

✧ Chaque machine dans la même étape peut seulement gérer un job à la fois, et chaque job ne peut être exécuté que par une machine à la fois ;

✧ La préemption n'est pas autorisée, c'est-à-dire qu'un job ne peut pas être interrompu tant que l'opération en cours n'est pas terminée ;

✧ Les machines sont disponibles au temps t=0 ;

### III.4 Modélisation mathématique et résolution

Les principales notations utilisées dans ce projet sont présentées dans la suite :

### III.4.1 Indice

t : indice des étages

i : indice des machines

j : indice des jobs

### III.5.3 Paramètre

k : nombre d'étage

n : Nombre de jobs

m: Nombre de machines parallèles non liées  
aux stages

J : Ensembles des jobs  $J = \{1,2,3,4,5,6,7\}$

nm : Nombre de jobs exécutés par la machine dédiée m du trois étages  $\in \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$

$J_m$  : Ensemble de jobs exécutés par la machine dédiée m du trois étages  
 $\in \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$

$M_{m1}$  : la machine dédiée du première étage ,  $m = 1,2,3$

$M_{m2}$  : la machine dédiée du deuxième étage ,  $m = 4,5$

$M_{m3}$  : la machine dédiée du troisième étage ,  $m = 6,7,8$

$P_{m1j}$  : Temps opératoire du job j sur la machine  $M_{m1}$

$P_{m2j}$  : Temps opératoire du job j sur la machine  $M_{m2}$

$P_{m3j}$  : Temps opératoire du job j sur la machine  $M_{m3}$

### III.4.3 Le problème

3HFS  $\beta, 2, 3 \square C_{max}$

L'objectif visé est la minimisation du makespan

$\min Z = C_{max}$

### III.4.4 Les variables de décisions

$T_{mj}$  : la date de début de traitement du job  $j$  sur la machine  $m$

$m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$

$C_{max}$  : Makspen

$X_{ij}^{mk} = \begin{cases} 1 & \text{si job } j \text{ exécuté directement après le job } i \text{ sur la machine } m \text{ de l'étage } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

$a_i^{mk} = \begin{cases} 1 & \text{si le job } i \text{ est affecté à la machine } m \text{ de l'étage } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

#### ✚ Sous les contraintes

- Le traitement d'un job dans un étage ne peut commencer que lorsque son traitement dans l'étage précédent est terminé :

$t_{m1} - t_{m2} \Rightarrow P_{m1j} \quad m=1, 2, 3, 4, 5$

$t_{m2} - t_{m3} \Rightarrow P_{m2j} \quad m=6, 7, 8$

- Si le job  $i$  ne précède pas  $j$  alors le job  $j$  précède  $i$  :

$Y_{ij} + Y_{ji} = 1$

- Le makespan est supérieur ou égale à la date de fin d'exécution de tout job dans l'étage 3 :  $C_{max} \Rightarrow t_{mj} + P_{mj}$

- Garantit que chaque opération est spécifique à exactement un étage :

$X_{ijk} = 1$

$X_{ijk} \in \{1, 0\} \quad \forall i = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, l_i, \forall k = 1, \dots, S$

#### ✚ L'organigramme de la méthode hybride adaptée

Un organigramme de la méthode adaptée est illustré à la figure 19. Les étapes spécifiques sont indiquées ci-dessous :



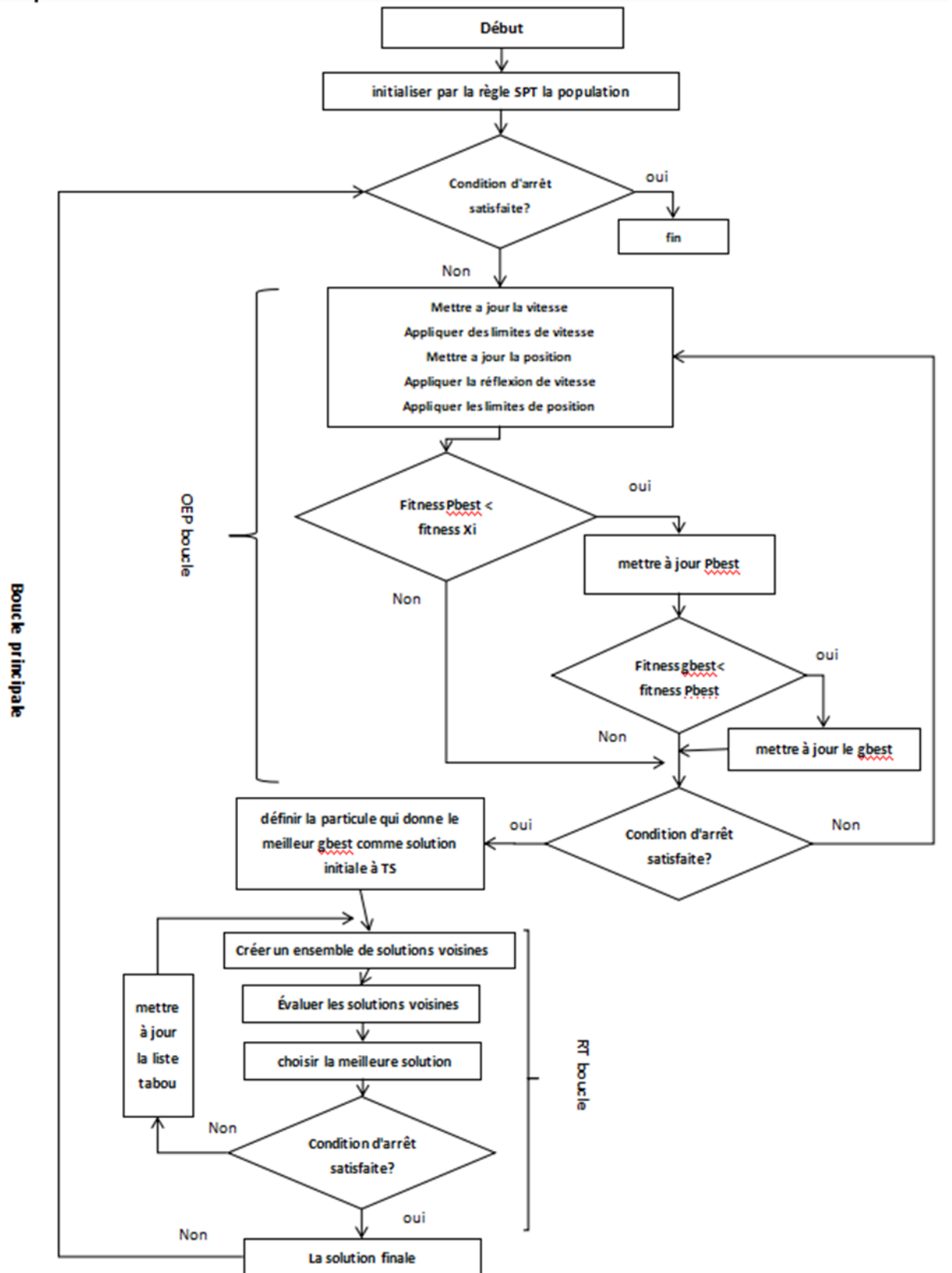


Figure 19: Organigramme de l'hybride de l'optimisation des essaims de particules et la recherche tabou

### III.5 Résultats et comparaison

#### III.5.1 Étude de cas

Le flow shop hybride est plus complexe que le flow shop classique. Il y a  $\prod_{i=1}^n n_i^m$  types de séquences de traitement.

Lorsque m jobs sont traités à travers n étapes, où n est le nombre de machines à l'étape i.

Sept jobs attendent d'être traités à l'usine de transformation, et chaque travail passe par le lattage, planification et meulage des étapes de traitement. Il y a trois tours, deux raboteuses et trois meuleuses dans trois étapes respectives. Les temps de traitement spécifiques sont illustrés dans le tableau suivant :

Job	Étages								
	Tour (s)			Raboteuse (s)		Meuleuse (s)			
	1	2	3	1	2	1	2	3	
1	24	75	51	84	62	39	54	11	
2	3	75	17	86	73	99	31	70	
3	66	17	71	52	23	33	16	18	
4	16	12	91	48	2	14	15	80	
5	80	17	22	89	14	38	14	51	
6	41	63	87	7	77	56	71	55	
7	33	84	21	51	97	63	46	21	

**Tableau 8:** Les temps de traitement dans l'ordonnancement d'atelier de flow shop hybride

Avec :

<b>Jobs</b>	<b>Machines</b>	<b>Infrastructure</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toutes les tâches sont disponibles au début (<math>t=0</math>)</li> <li>• Aucune nouvelle tâche est ajoutée à la liste de tâches une fois la production lancée pour la première fois</li> <li>• Toutes les tâches peuvent être sélectionnées à tout moment.</li> </ul> <p>Il n'y a pas de séquence de commande conditionnelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production d'un type de famille de produits</li> <li>• Les pannes de machine ne sont pas pris en considération</li> <li>• Les machines ne sont pas configurées pour premier emploi au début</li> <li>• Une machine ne peut traiter qu'un seul travail à la fois.</li> <li>un temps</li> <li>• Un travail doit être terminé sur une machine avant qu'un autre travail ne soit traité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toutes les données de job et de machine sont disponibles en temps réel</li> <li>• Toutes les matières premières nécessaires sont disponibles au début de la production</li> <li>• Tous les tampons du système ont capacité illimitée</li> <li>• Les temps de transport entre les étapes sont pas considéré</li> </ul>

**Tableau 9:** la représentation des notations du fonctionnement de HFS

Le HFSP ne contient que sept emplois et trois étapes, mais il y a  $3^7 \times 2^7 \times 3^7 \approx 6 \times 10^8$  différentes séquences de traitement. La complexité du PFSH est très élevée, les trois méthodes ont également été utilisés pour le résoudre.

Le nombre d'itérations a été fixé à 400 ;

Étant donné que le nombre de machines à chaque étape est différent : par insérer la partie de l'initialisation des paramètres à partir de entré le : `stageMachQty=[3,2,3]`; et selon `stagemachQty` en insérer une fonction pour générer un tableau pour les étapes et les code machine ( pour chaque étape en affect leur code machine ) comme le suite:

MachProcesse s							
<b>1</b>	2	3	4	5	6	7	8

1	1	1	2	2	3	3	3
---	---	---	---	---	---	---	---

**Figure 20** :les étapes avec leurs codes machines

### III.5.2 Mise en œuvre de SPT

La règle SPT (Shortest Processing Time) qui désigne que la plus haute priorité est accordée à l'opération en cours avec le temps de fonctionnement le plus court est utilisée afin de gérer une solution faisable pour la méthode adaptée.

Cette sélection est basée sur la règle de priorité SPT qui favorise les machines qui ont le temps de traitement faible parmi les machines candidates, par exemple le M1 est sélectionné pour l'O11 en raison de son temps de traitement minimum.

Job	Étages								
	Tour (s)			Raboteuse (s)		Meuleuse (s)			
	1	2	3	1	2	1	2	3	
1	24	75	51	84	62	39	54	11	
2	3	75	17	86	73	99	31	70	
3	66	17	71	52	23	33	16	18	
4	16	12	91	48	2	14	15	80	
5	80	17	22	89	14	38	14	51	
6	41	63	87	7	77	56	71	55	
7	33	84	21	51	97	63	46	21	

**Tableau 10**:Les opérations et les machines sélectionnées pour la génération de la solution initiale

Nous pouvons clairement observer qu'il s'agit simplement d'une transformation en un problème classique de flow shop classique, Le résultat de l'analyse de cette sélection est :

Job 1 : M11\_M22\_M33

Job 2 : M11\_M22\_M23

Job 3 : M21\_M22\_M23

Job 4 : M21\_M22\_M13

## Chapitre 03 : Une approche hybride pour la résolution d'un flow shop hybride

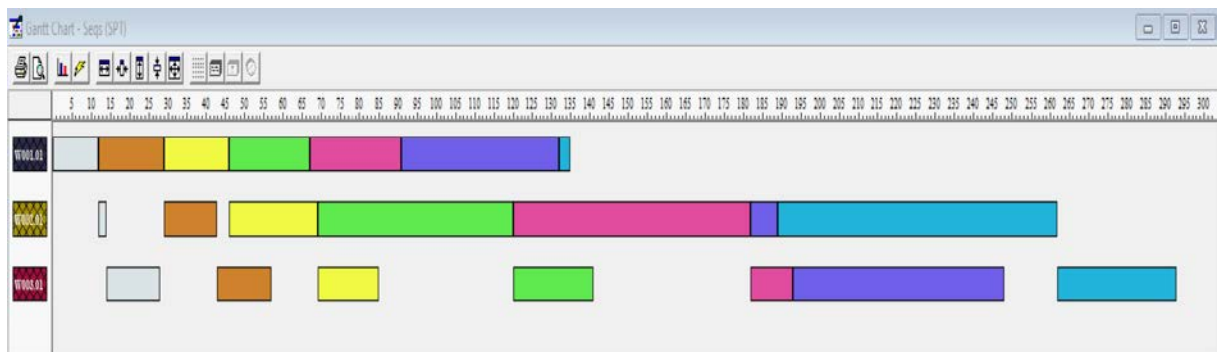
Job 5 : M21\_M22\_M23

Job 6 : M11\_M12\_M33

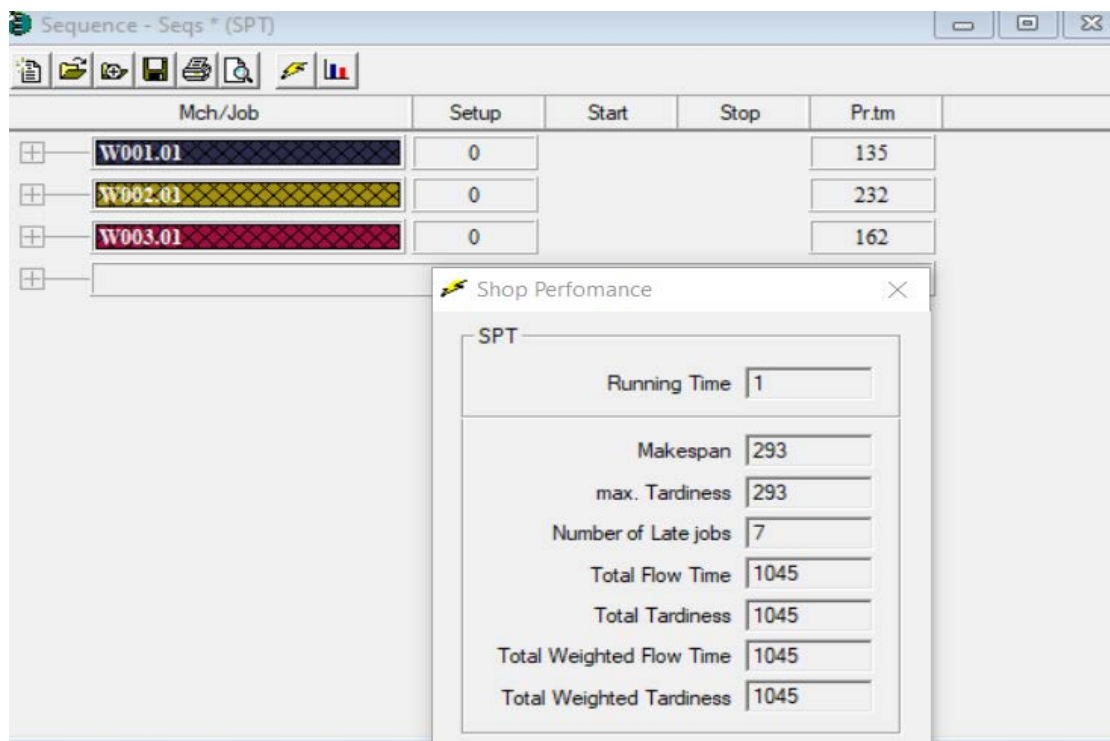
Job 7 : M31\_M12\_M33

La conception pour une solution initiale par la règle SPT comme la suivante :

- Par l'utilisation de logiciel LEKIN : Saisir les données des étages et de temps de cycle utilisées par la tâche pendant le passage à travers chaque machine.



**Figure 20:** diagramme de Gantt par la règle SPT obtenu par LEKIN



**Figure 21:** résultat des performances obtenu par LEKIN

ID	Wght	Fls	Due	Prtm.	Stat.	Bgn	End	T	wT
J001	1	0	0	97		67	193	193	193
J002	1	0	0	107		132	293	293	293
J003	1	0	0	56		29	85	85	85
J004	1	0	0	28		0	28	28	28
J005	1	0	0	45		12	57	57	57
J006	1	0	0	103		91	248	248	248
J007	1	0	0	93		46	141	141	141

**Figure 22:** résultat des temps d'entrer et sortie des jobs obtenir par LEKIN

Analyse des résultats :

- La solution de séquence des tâches précoces par ordre de :

J4	J5	J3	J7	J1	J6	J2
----	----	----	----	----	----	----

**Figure 23:** Codage d'un job

- Le temps de fin de traitement :  $C_{max} = 293$
- Temps d'écoulement total = 1045
- Temps total pondéré (équilibré) = 1045

### III.5.3 Mise en œuvre de OEP

Avec une solution initial obtenu par la règle SPT le programme commence par un essaim initialisé au hasard. Ensuite, en implémentant la fonction objective, les particules recherchent leur fitness. Depuis le calcul de fitness, la position et la vitesse d'une particule sont différentes des autres particules.

L'ordonnancement global est affiché dans les figures si dessus :

Algorithme	Paramètre	Valeur
OEP	C1, C2	2, 2
	W	0.5
	La taille de la population	10
	itération	<200

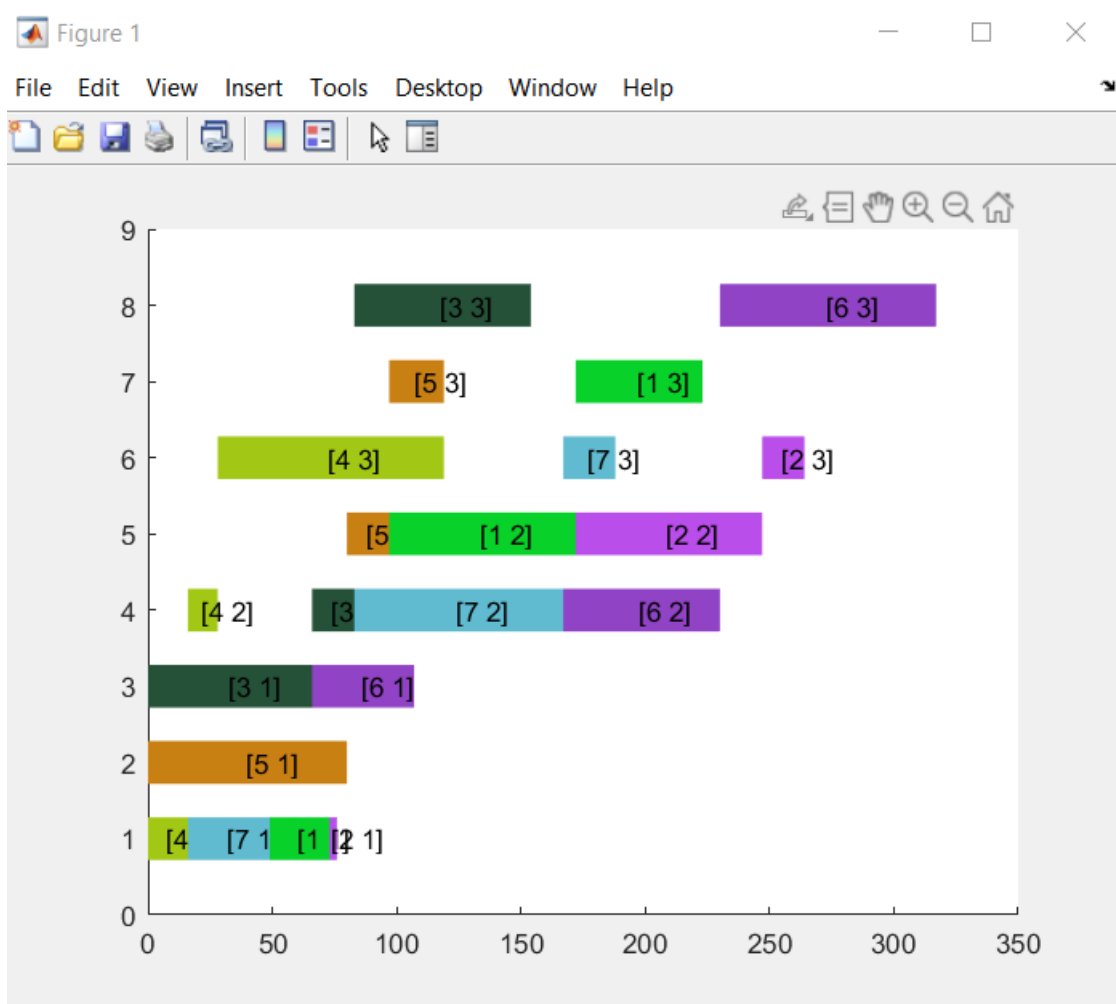
**Tableau 11:**Réglage du paramètre de l'OEP

La figure suivante présente le codage de solution pour les machines qui doit traiter les sept jobs à chaque étage obtenu par le séquençement de la règle SPT :

4	5	3	7	1	6	2	4	5	3	7	1	6	2	4	5	3	7	1	6	2
1	2	3	1	1	3	1	4	5	4	4	5	4	5	6	7	8	6	7	8	6

**Figure 25 :** Codage des machines de tous les étage avec le séquençement des jobs

Avec un diagramme de Gantt qui représente l'écoulement des jobs dans les machines à chaque étage avec un Cmax égale à 317, chaque job est représenté dans le diagramme de Gantt par deux chiffres, le premier chiffre est la numérotation des jobs et le second symbolise l'étage des jobs la figure suivante montre ce diagramme :



**Figure 26 :** Un diagramme de Gantt afficher par Matlab pour l'ordonnancement de SPT\_OEP

**III.5.4 Mise en œuvre de la recherche tabou :**

Par définir la solution obtenue par le SPT\_OEP comme une solution initiale de la recherche tabou, la solution du problème utilise la solution d'historique qui est utilisée comme recherche de voisinage pour obtenir une meilleure solution lors de la prochaine recherche, générer une solution à partir d'un codage des machines alternatives pour avoir un Cmax minimale.

Algorithme	Paramètre	Valeur
RT	Longueur liste itération	La racine carrée arrondie de 7*8 200

**Tableau 12:**Réglage du paramètre de RT

La figure suivante affiché le Cmax minimale trouver par notre méthode hybride SPT\_OEP&RT :

```
costs =
Columns 1 through 14
317  176  176  176  176  176
```

**Figure 27 :**Cmax obtenu par notre méthode sous Matlab

En suite une figure de codage des machines alternatives pour un Cmax minimale :

4	5	3	7	1	6	2	4	5	3	7	1	6	2	4	5	3	7	1	6	2
2	2	3	1	1	3	1	4	5	4	4	5	4	5	6	7	8	6	7	8	6

**Figure 28 :**Codage des machines de tous les étage avec le séquençement des jobs



## 6.1 Les comparaisons avec les autres algorithmes

Les définitions des algorithmes qui sont proposées à résoudre le même cas :

### III.6.1.1 Fireworks Algorithm (FWA):

C'est une méthode d'optimisation métaheuristique s'inspire du phénomène d'explosion de feux d'artifice, où une solution au problème est analogue à un feu d'artifice ou à une étincelle, et une explosion est analogue à une opération de recherche stochastique dans l'espace de solution entourant le feu d'artifice. [ZHA & al 17]

#### ❖ Principe

Le principe clé de la FWA est que les feux d'artifice de fitness plus élevé peuvent exploser un plus grand nombre d'étincelles dans une zone plus petite, tandis que les feux d'artifice de fitness inférieur explosent moins d'étincelles dans une plus grande amplitude. [XUE & al 20]

### III.6.1.2 Whale optimization algorithm (WOA)

L'algorithme WOA[MIR & LEW 16] est une nouvelle métaheuristique qui reproduit le comportement social des baleines à bosse dans leur quête de proies et qui met en œuvre les stratégies suivantes utilisées par les baleines à bosse, telles que l'attaque au filet à bulles et la chasse aux proies[ABD & al 18].

L'environnement expérimental était MATLAB 2021 sous Windows 10. La fréquence du CPU de l'ordinateur expérimental était de AMD Ryzen 7 avec Radeon graphique @ 2.00GHz et la taille de la mémoire était de 16,00Go.

Cinq algorithmes ont été utilisés pour tester les performances de la méthode adaptée, Les réglages des paramètres spécifiques sont répertoriés dans le tableau suivant :

Algorithme	Paramètre	Valeur
------------	-----------	--------

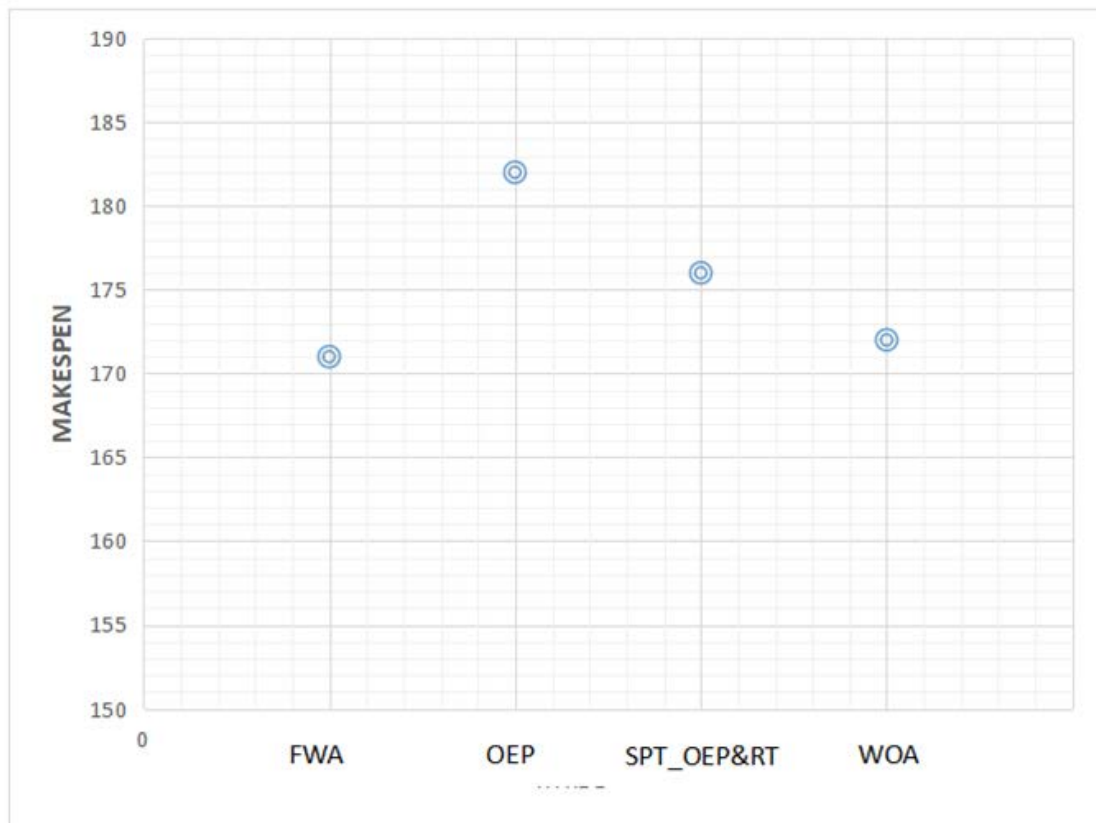
FWA	Nombre de feux d'artifice N M A Constante a Constante b A initiale A finale	5 50 4 0.04 0.8 $(ub - lb) \times 0.02$ $(ub - lb) \times 0.001$
OEP	C1, C2 La taille de la population l'intervalle de vitesse des particules	1.49445 40 [-1,1]
WOA	La taille de la population b p	40 1 0.5
SPT_OEP	Une solution initiale par le SPT C1, C2, W La taille de la population l'intervalle de vitesse des particules	2,2,0.5 10 [-1,1]
SPT_OEP & RT	Une solution initiale par le SPT C1, C2 La taille de la population l'intervalle de vitesse des particule Longueur Liste	2,2,0.5 10 [-1,1]  La racine carrée arrondie de $7 \times 8$ pour un problème de 7 job et 8 machine

Ce tableau exposant les 4 méthodes avec leurs Cmax et temps d'exécution (CPU) :

Algorithme	Cmax	Temps d'exécution (seconde)
FWA	171	12.85
WOA	172	1.78
OEP	182	1.99
SPT_OEP&RT	176	2.05

**Tableau 14 :** Comparaisons des optimisations dans HFS

La figure suivante présente un graphe de point pour les cinq algorithmes au cours de la résolution de cette instance depuis HFSP. Il est clair que les résultats d'optimisation obtenus étaient plus volatils à cause de la complexité du HFSP. Il est évident que la répartition globale des résultats obtenus par le IFWA était la plus concentrée et que le makespan global était inférieur à celui des quatre autres algorithmes. Constatant la convergence des résultats.



**Figure 29 :** le *Makespan* optimal pour les quatre algorithmes

### III.7 Conclusion

Un algorithme de SPT\_OEP&RT a été proposé pour minimiser le *makespan* dans un atelier flexible de type flow shop hybride.

### Chapitre 03 : Une approche hybride pour la résolution d'un flow shop hybride

Le SPT\_OEP&RT pourrait trouver une bonne solution acceptable, mais pas idéale pour les autres méthodes proposées.

Le OEP avec une initialisation d'essaim au hasard est de bonne solution par rapport de l'ajouté une solution initial par la règle SPT.



***Conclusion Générale***

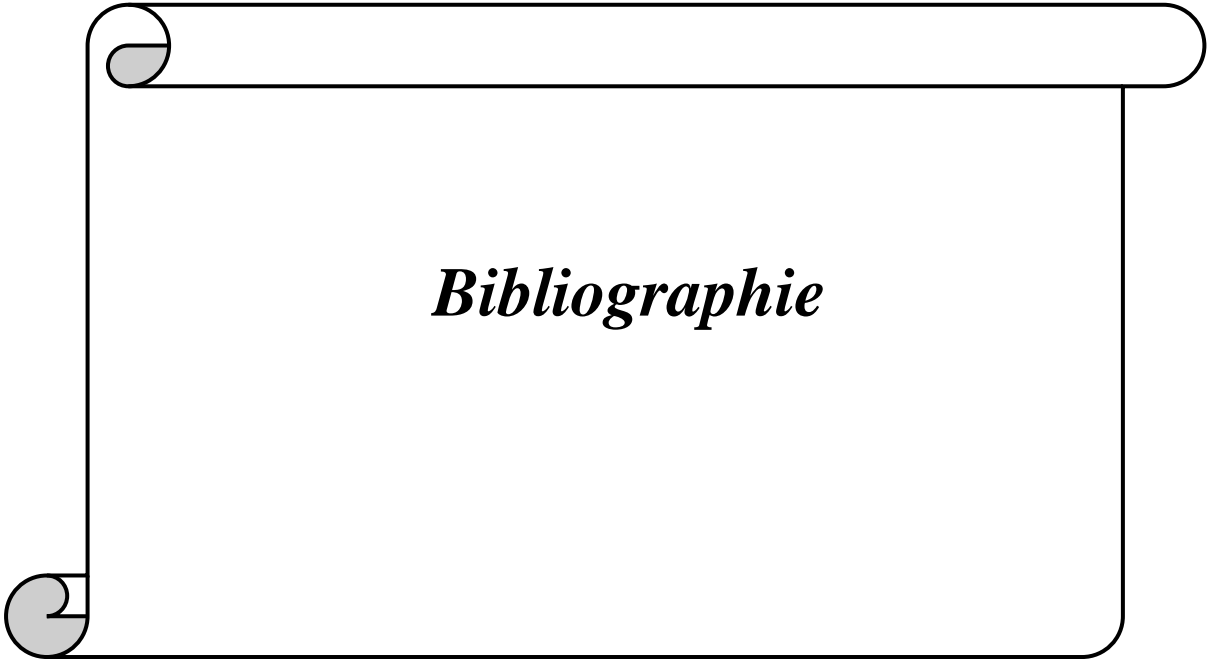
## ***Conclusion générale***

Afin de réduire le *Makespen* et en raison du type d'environnement de production que nous visons et qui est abordé dans ce travail, nous disons que le flow shop hybride est un type d'ingénierie complexe de grande importance et il est considéré comme l'un des plus étudiés dans les systèmes de production.

L'ordonnancement est un moyen de décision et d'action, Il est principalement basé sur la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire, qui à son tour repose sur la recherche en place d'un ensemble de solutions candidates.

En d'autres termes, le problème d'ordonnancement nécessite des méthodes approchées pour trouver des solutions de manière stochastique , et c'est ce que nous avons montré dans notre travail sur la résolution du problème d'ordonnancement dans le cadre d'un environnement de production du type flow shop hybride , lorsqu'une méthode hybride a été proposé en soi basé sur la combinaison de deux types de métaheuristique afin d'atteindre une meilleure solution, ou ce que nous appelons dans notre travail l'objectif plus large, qui est de réduire le *Makespen*.

En entrée de travail sur la résolution de ce problème, une solution initial a été présentée par la règle SPT, à partir de laquelle le travail de l'optimisation par essaim de particule sera lancée, de sorte que ce dernier devienne une solution initiale pour la recherche tabou, qui travaille à la recherche de la meilleure solution, est-ce que nous avons appelé notre méthode hybride proposée, qui nous a finalement fourni une solution de bonne qualité, mais lorsque nous avons abordé la comparaison sur laquelle nous allions travailler, dans laquelle le même problème a été résolu, mais avec des autres méthodes proposées , nous avons remarqué que notre méthode proposée n'était pas la meilleure solution.



***Bibliographie***

- [ABD & al 18] Abdel-Basset, M. ; Manogaran, G. ; El-Shahat, D. ; Mirjalili, S. A hybrid whale optimization algorithm based on local search strategy for the permutation flflow shop scheduling problem. *Future Gener. Comput. Syst.* 2018, 85, 129–145
- [BAK 74] Baker, R, (1974). *Introducing to sequencing and scheduling*. Jhon Wiley & Son, New York.
- [BAP 98] Baptiste P. (1998), *une étude théorique et expérimentale de la propagation descontraintes de ressources*. Thèse de doctorat, université Technologique de Compiègne No : 98 COMP 1141.
- [BEL 09] A. Bellanger. *Ordonnancement sur les machines à traitement par batches et contraintes compatibilité*. Thèse en informatique, institut national Polytechnique de Lorraine-INPL 2009, 22
- [BEL 54] R. Bellman. *The threory of dynamic programming*. Technical Report No. RAND-P-550, Rand Corp. Santa Monica, CA, 1954. 25
- [BEN 09] BEN HMIDA SAKLY. A, *Méthodes arborescentes pour la résolution deproblèmes d'ordonnancement flexible*, Thèse de doctorat, université de Toulouse, Le 12/12/2009
- [BRU 04] Brucker P., (2004). “*Scheduling Algorithms*”. Springer, Berlin.
- [BRU 90] Brucker P., Schlie R., (1990). “*Job shop scheduling with multi-purpose machines*”, *Computing* 45, 369–375.
- [CAR & al 88]Carlier, J. et Chrétienne, P, *Problèmes d’ordonnancement : modélisation / complexité /algorithmes*, Etude et recherche en informatique, Paris : Masson, 1988.
- [CAR & REB 96] Carlier. J and Rebaï. I, *Two branch and bound algorithms for the permutation flow shop problem*. *European Journal of Operational Research*, 90(2) :238–251, 1996.
- [CON & al 67] Conway, R, W., Maxwell, W. L., Miller, L. W. (1967). *Theory of scheduling*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [COO & al 08] Y. Cooren, A. Nakib, P. Siarry. *Image Thresholding using TRIBES, a parameter-free Particle Swarm Optimization Algorithm*. *Proceedings of the International Conference on Learning and Intelligent Optimization*, pp 81-94. Springer, 2008.



[COR & al 10] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. Algorithmique. Dunod, 2010.26

[DAM & al 21] Damand. D, Barth. M, Dkhil. A, Revue Française de Gestion Industrielle. Diagnostic 4.0 du système physique de production : modèle de référence d’audit des gammes de production.2021, Vol. 35, No. 1, 24-39.

[DAN & SEL 54] George Dantzig, Ray Fulkerson, and Selmer. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. Journal of the operations research society of America, 2(4) :393–410, 1954.

[DUV 00] Duvivier D. Etude de l'hybridation des méta-heuristiques, Application à un problème d'ordonnancement de type jobshop, Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, LIL, Calais 2000.

[ESQ & LOP 99] Esquirol P., Lopez P., (1999). “L’ordonnancement”, Economica, Collection Gestion, Série : "Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion", Paris, 1999, ISBN 2-7178-3798-1.

[FON 99] Fontanili F., Intégration d’outils de simulation et d’optimisation pour le pilotage d’une ligne d’assemblage multiproduit a transfert asynchrone, thèse de doctorat Université Paris XIII, 1999

[GAR & JOH 79] Garey, M. R., Johnson, D. S. (1979). Computers and intractability: A guide of the theory of NP-Completeness. W. H. Freeman and company, San francisco

[GIA 88] GIARD, V. "Gestion de Production". Paris : Economica, 1988. 1068p.

[GON & SAH 76] Gonzalez, T., Sahni, S. (1976). Open shop scheduling to minimize finishe time. Journal of the Association of computing Machinery, 23, 665-679.

[GOT 93]GOTHA, Les problèmes d’ordonnancement, Revue française d’automatique, d’informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle, tome 27, no 1 (1993), p. 77-150

[GOU 03] M.Gourgand, N. Grangeon et S.Problème d’ordonnancement dans les systèmes de productions de type Flow Shop hybride en contexte déterministe. Norre.J3eA, Journal sur l’enseignement des sciences et technologies de l’information et des systèmes, Volume 2, Hors-Série 1, 1 (2003).

[GRA 79] Graham R.L., Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan., A.H.G. (1979), Optimisation and approximation in deterministic sequencing and scheduling : à survey, Annals of Discrete Mathematics ;5: 236-287.

[GUN 06] Günther R. Raidl , A Unified View on Hybrid Metaheuristics, Institute of Computer Graphics and Algorithms Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 2006.

[GUP 88] Gupta J.N.D., (1988). "two-stage hybrid flow shop scheduling problem", Journal of Operational Research Society 39, 359-364.

[HAC 13] HACHIMI.H, HYBRIDATIONS D'ALGORITHME MÉTAHEURISTIQUES EN OPTIMISATION GLOBALE ET LEURS APPLICATIONS, THÈSE DE DOCTORAT. Université Mohammed V- Agdal, Rabat École Mohammadia d'Ingénieurs, 2013

[HER 15] Herr. N, Contribution à l'ordonnancement post-pronostic de plate-forme hétérogènes et distribuées : approche discrète et continue, Thèse de Doctorat, L'U.F. R des sciences et technique d'université de France-compté. Spécialité : informatique, 2015.

[JAC 56] Jackson J.R., (1956). "An Extension of Johnson's Results on Job Lot Scheduling". Naval Research Logistic Quarterly, 1, 61-68.

[JAK & GUN 05] Jakob Puchinger and Günther R Raidl. Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization: A survey and classification. In International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, Springer, 2005.

[JAV 04] Javel G., Organisation et Gestion de la Production, 3 édition , DUNOD , Paris 2004

[JAV 93] JAVEL G. "*L'Organisation et la Gestion de Production*". Paris : Masson, 1993. 328p.

[JOH 54] Johnson, S. M. (1954). Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. Naval Research Logistics Quarterly, 1, 61-67.

[LAN & DOI 60] A. H. Land and A. G. Doig. An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 28(3) :497520, July 1960.25

[LAW & al 89] Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G., Shmoys, D. B., (1989). "Sequencing and scheduling: algorithms and complexity". Technical Report NFI 11.89/03,

- [MAH & ROS 14] Mahdavi. M and Rostami. M, A branch-and-bound algorithm for two-machine flow-shop scheduling problems with batch delivery costs. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, 1(2) :94–104, 2014.
- [MIC 83] Michel Minoux. *Programmation mathématique, théorie et algorithmes*, volume 2 of collection technique et scientifique des télécommunications, 1983.
- [MIR & LEW 16] S. Mirjalili, A. Lewis, The whale optimization algorithm, *Adv. Eng. Softw.* 95 (2016) 51–67.
- [MOH 18] Mohammed el amine Meziane, thèse de doctorat, proposition d'une approché d'ordonnancement pour les ateliers de type job shop flexible 2018
- [MOU 06] MOURANI. I, Étude des systèmes de production automatisée soumis à des aléas, thèse pour obtenir le grade de docteur. Spécialité : Automatique, L'université de PAUL VERLAINE-METZ, le 19 septembre 2006.
- [MUL 93] MULIGENS, H. "Les Nouvelles Organisations Productives". *Revue Française de Gestion Industrielle*, 1993, Vol. 12, No.3, p.S-30
- [NEW 80] Newella. The heuristic of George Polya and its relation to artificial intelligence. A paper given at The International Symposium on the Methods of Heuristic. University of Bern, Switzerland, Sept. 15-18, pp.16. (Published in Groner et al. (1983), pp. 195-244. 1980.
- [OSM & LAP ]I.H. Osman, G. Laporte. *Metaheuristics in combinatorial optimization*:1996
- [PIN 95] Pinedo M., (1995). "Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems". Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [ROU 11] F. Routhlauf. *Design of modern heuristics: Principles and Application*. Naturel Computing Series. Springer, 2011. 26,89
- [RUH 07] RUHLMANN. C, « Projet fin d'étude étude du probleme de job shop avec un convoyeur », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, (2007).
- [SAD 02]Sadfi. C, *Problèmes d'ordonnancement avec minimisation des encours*, Thèse pour obtenir le grade de doctorant spécialité génie industriel, institut national polytechnique de GRENOBLE, 2002
- [SAK 84] SAKAROVICH, *Optimisation combinatoire*, HERMANN, Paris, France, 1984.
- [SLA 71] J. R. Slagle. *Artificial intelligence : The heuristic programming approach*. McGrawHill. pp. 3. New York, 1971

[TAL 02] Talbi E.G., A taxonomy of hybrid metaheuristics. Journal of Heuristics 8(5), pp.541-565, 2002.

[TAN & al 94] Tanaev V. S., Sotskov Y. N., Strusevich V. A., (1994). "Scheduling Theory. Multi-Stage Systems". Kluwer, The Netherlands.

[TOT 20] Tota Mat. M, A Restarted Iterated Pareto Greedy algorithm for the multi-objective hybrid flow shop scheduling problem, Master of Science in Mechanical Engineering, POLITECNICO DI MILANO, AA 2019-2020

[VIN 97] A. Vingier. Contribution a la résolution de problème d'ordonnancement de type monogamme multimachines (Flow Shop hybride). PhD thesis, Université de Tours, 1997.

[XIA 94] Xiaojun –ye (Ingénieur en Mécanique Industrielle): « La modélisation et Simulation des Systèmes de Production : une Approche Orientée—Objets », Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 1994.

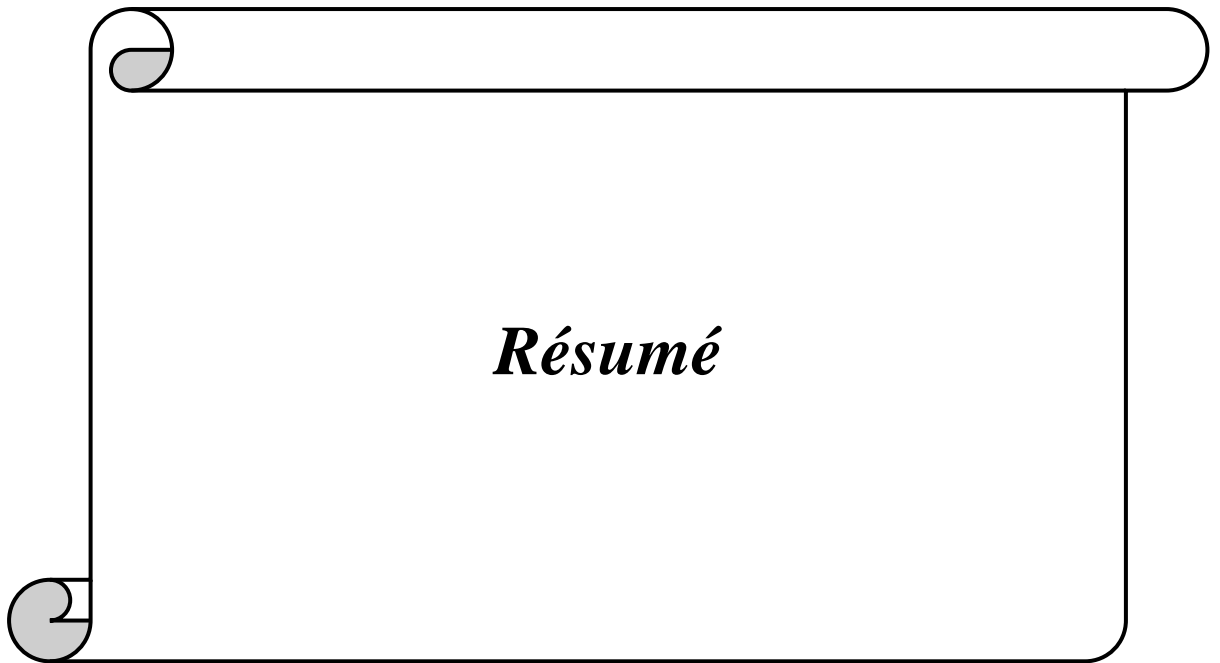
[XIE 89] XIE, X.L. "Contrôle Hiérarchique d'un Système de Production Soumis à Perturbations", Thèse Doct. Université de Nancy I, 1989. 187p.

[XUE & al 20] Xuelian Pang 1,2, Haoran Xue 3, Ming-Lang Tseng 4,5,6, \*, Ming K. Lim 7 and Kaihua Liu 1. Hybrid Flow Shop Scheduling Problems Using Improved Fireworks Algorithm for Permutation. Applied science. 2020

[ZHA & al 17] Zhang, B. ; Zheng, Y.J. ; Zhang, M.X. ; Chen, S.Y. Fireworks Algorithm with Enhanced Fireworks Interaction. IEEE ACM Trans. Comput. Biol. Bioinform. 2017, 14, 42–55.

[ZHA 11] Zhang, Yudong ; Lenan Wu (2011). "A Hybrid RT-OEP Optimization Algorithm"

[1]<https://fr.mathworks.com/discovery/industry-4-0.html>



***Résumé***

## Résumé :

Cette œuvre vise à résoudre un problème d'ordonnancement dans un atelier flexible de type flow shop hybride, Les problèmes d'ordonnancement de l'atelier sont généralement classés comme NP-Difficiles, Leur résolution exige des méthodes approchées et adaptées à leur niveau de complexité. Le but de notre travail est de proposer et de tenter d'adopter des techniques issues des métaheuristiques pour résoudre de tels problèmes tout en minimisant le temps d'exécution total de Makespan. Une méthode hybride proposée basée sur la génération d'une bonne solution initiale par la règle d'affectation SPT pour le OEP et après notre solution finale obtenu par le OEP considéré comme une solution initiale pour le RT afin de donner des solutions plus proches de l'optimum, notre méthode contient deux métaheuristiques et une règle d'affectation pour but est de la minimisation du temps total d'exécution des tâches.

**Mots clés :** ordonnancement, flow shop hybride, métaheuristique, Makespen, OEP, RT, SPT, méthode hybride.

## Abstract

This work aims to solve a scheduling problem in a flexible workshop like hybrid flow shop, Workshop scheduling problems are generally classified as NP-Difficile, their resolution requires methods that are approximated and adapted to their level of complexity. The purpose of our work is to propose and attempt to adopt techniques from metaheuristics to solve such problems while minimizing the total execution time of Makespan. A proposed hybrid method based on the generation of a good initial solution by the SPT allocation rule for the OEP and after our final solution obtained by the OEP considered as an initial solution for the RT to give solutions closer to the optimum, our method contains two metaheuristics and an allocation rule for the purpose is to minimize the total time of execution of tasks.

**Keywords:** scheduling, hybrid flow shop, metaheuristic, Makespen, OEP, RT, SPT, hybrid method

## الملخص

يهدف هذا العمل إلى حل مشكلة الجدولة في ورشة عمل من نوع ورشة التدفقات الهجينة المرنة، وتصنف مشكلات جدولة ورشة العمل عمومًا على أنها من مشاكل التحسين الصعبة ن ب، ويتطلب حلها طرقًا تقريبية تتكيف مع مستوى تعقيده الهدف من عملنا هو اقتراح ومحاولة تبني تقنيات من فوقية الاستدلال لحل مثل هذه المشاكل مع تقليل وقت التنفيذ الكلي للوقت الاجمالي للانتاج طريقة هجينة مقترحة تعتمد على توليد حل أولي جيد من خلال قاعدة تخصيص أقصر وقت للمعالجة لتحسين سرب الجسميات بعد حلنا النهائي الذي حصل عليه تحسين سرب الجسميات يعتبر حلاً أولياً للبحث تاو من أجل إعطاء حلول أقرب إلى الأمثل، طريقتنا تحتوي على اثنان من فوقية الاستدلال وقاعدة تعيين بغرض تقليل إجمالي وقت تنفيذ المهمة

**الكلمات المفتاحية:** الجدولة، ورشة عمل مرنة، فوقي الاستدلال، طريقة هجينة، خوارزمية حركة سرب الجزيئات، خوارزمية البحث تاو، مبدأ المعالجة قصيرة المدى، التهجين.