

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **Mémoire**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En : Génie Industriel**

**Spécialité : Ingénierie de Système**

**Par : RAOUD Kaouthar et OULHACI Amina**

**Intitulé**

**Modélisation et simulation d'un problème d'ordonnancement de  
type job-shop flexible sous contraintes d'indisponibilités des  
machines**

Soutenu le 29 / 09 / 2021, devant le jury composé de :

**M. HASSAM AHMED**

**MCB**

**Président**

**M<sup>lle</sup>. HOUBAD YAMINA**

**MAA**

**Examinatrice**

**M. GUEZZEN AMINE HAKIM**

**MCB**

**Encadrant**

Année universitaire : 2020/2021

# Remerciements :

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre mémoire et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps à remercier notre encadrant, **M. GUEZZEN AMINE HAKIM** pour sa persévérance, sa disponibilité, sa sagesse ses précieux conseils, ses orientations et surtout ses qualités humaines.

Nos respectueux remerciements sont dédiés aux membres du jury, **M<sup>elle</sup> YAMINA HOUBAD et M. AHMED HASSAM**, d'avoir accepté d'examiner et de porter leur jugement sur ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. Nous remercions nos sœurs **NAJEH, WAFAE, IKRAM, WARDA, SOUHILA, HAYAT, HANAE** pour leurs encouragements.

Ce mémoire n'aurait pas eu lieu sans le soutien de nos très chers amis **SOUMIA, ABASSIA, IBTISSEM FATIMA ZOHRA, FERIEL, ZINEB** et **SOULEF**. Nos nouvelles sœurs

# Dédicace

- A mon ami mon amour mon très chère marie **BOUFATEH ALI**
- Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite. A l'être le plus cher de ma vie ma mère. A celui qui me fait une femme mon père Taybi .

A mes chères sœurs et à tous les enfants.

A ma copine **Kaouthar**.

A notre chère amie **Dounia Bentayeb**.

A tous personne qui porte le nom **OULHACI**.

A tous personne qui porte le nom **RAOUD**.

# Table des matières

<i>Table des figures</i> .....	vi
<i>Liste des tableaux</i> .....	viii
<i>Introduction générale</i> .....	1
1 Chapitre I : Généralités et littératures .....	1
1.1 Introduction :.....	2
1.2 Production :.....	2
1.2.1 Définition de la production : .....	2
1.2.2 Type de production : .....	3
1.2.3 Gestion de production : .....	3
1.2.4 Le rôle de la gestion de production :.....	3
1.2.5 Les systèmes de production : .....	3
1.2.6 Le système de production de type job shop : .....	3
1.3 Ordonnancement :.....	4
1.3.1 Généralité sur l'ordonnancement :.....	4
1.3.2 Les classes d'ordonnancement :.....	5
1.3.3 Notation des problèmes d'ordonnancement :.....	7
1.4 Les types d'ateliers de production : .....	8
1.4.1 Seule machine :.....	8
1.4.2 Machines en parallèle : .....	8
1.4.3 Flow shop :.....	9
1.4.4 Open shop : .....	9
1.4.5 Job shop : .....	9
1.5 Représentation des problèmes d'ordonnancement.....	10
1.5.1 Le diagramme de Gantt (tableaux de bord) : .....	10
1.5.2 Graphe Potentiel-Tâches :.....	10
1.5.3 Méthode PERT : (technique d'évaluation et d'examen de programmes) .....	11
1.6 Règles de priorité :.....	11
1.7 Méthodes d'optimisation : .....	11
1.7.1 Méthodes exactes :.....	12
1.7.2 Méthodes approchées :.....	13
1.8 Etat de l'art sur la résolution du FJSP :.....	18
1.8.1 Mesures de performance : .....	18
1.8.2 Méthodes de résolution :.....	19
1.9 Conclusion : .....	21

2	Chapitre II : Systèmes flexibles et Job Shop Flexible.....	22
2.1	Introduction :.....	23
2.2	Systèmes flexibles de production :.....	23
2.2.1	Flexibilité :.....	24
2.2.2	Réactivité :.....	25
2.2.3	Robustesse :.....	25
2.3	Les principaux composants du FMS :.....	25
2.4	Différents types de FMS :.....	26
2.5	Types de disposition du FMS :.....	26
2.6	Objectifs d'un FMS :.....	29
2.6.1	Implémentation d'un FMS :.....	31
2.6.2	Avantages et inconvénients d'implémentation du système flexible :.....	31
2.7	Technologie CIM.....	31
2.7.1	Définition :.....	31
2.7.2	Les éléments d'un système CIM :.....	32
2.7.3	Les avantages et limitations du CIM :.....	32
2.8	Technologie du groupe et système cellulaire :.....	33
2.8.1	Définition :.....	33
2.8.2	Raisons d'utiliser la technologie de groupe : [34].....	33
2.8.3	Système cellulaire :.....	34
2.8.4	Avantages de la TG :.....	36
2.9	Avantages d'un système flexible :.....	37
2.10	Difficultés d'un système flexible :.....	37
2.11	Job shop flexible :.....	37
2.11.1	Formulation classique de problème :.....	38
2.11.2	Complexité :.....	39
2.12	Conclusion :.....	40
3	Chapitre III : Présentation et formulation du problème.....	41
3.1	Introduction :.....	42
3.2	Présentation du système FJSP étudié :.....	42
3.3	Modélisation du système proposé :.....	43
3.3.1	Comparaison des résultats trouvés par LEKIN :.....	45
3.4	Présentation du problème :.....	47
3.5	Présentation d'algorithme proposé :.....	49
3.5.1	Les étapes d'algorithme :.....	49
3.5.2	L'organigramme d'algorithme proposé :.....	50

3.6	Conclusion :	51
4	Chapitre IV : Simulation et analyse des résultats.....	52
4.1	Introduction :	53
4.2	Représentation du système simulé sous Arena :	53
4.3	Modélisation et simulation sans pannes :	57
4.3.1	Sans prendre en considération le temps de manutention :	57
4.3.2	Avec un temps de manutention fixe :	58
4.4	Modélisation et simulation en présence des pannes :	59
4.4.1	Modélisation :	60
4.4.2	Simulation :	60
4.4.3	Comparaison des résultats :	61
4.5	Modélisation utilisons l’algorithme proposé :	63
4.6	Implantation d’algorithme dans la simulation :	71
4.7	Interprétation et comparaison des résultats :	73
4.8	Conclusion :	74
5	<i>Conclusion Générale :</i>	75
6	<i>-Annexe A-</i>	76
7	<i>-Annexe B -</i>	77
8	<i>-Annexe C -</i>	78
9	<i>Bibliographie.....</i>	83

# Table des figures

Figure 1-1 Schéma du système de production [2].....	2
Figure 1-2 Schémas d'une seule machine. ....	8
Figure 1-3 Schémas des machines parallèles. ....	9
Figure 1-4 Schéma d'un atelier de type flow shop. ....	9
Figure 1-5 Schéma d'un atelier de type job shop.....	9
Figure 1-6 Diagramme de Gantt .....	10
Figure 1-7 Exemple d'un Graphe potentiel-taches. ....	10
Figure 1-8 Différentes méthodes d'optimisation .....	12
Figure 1-9 Fonctionnement général de recherche tabou .....	16
Figure 1-10 Fonctionnement général du recuit simulé .....	17
Figure 1-11 Fonctionnement général d'algorithme génétique.....	18
Figure 1-12 Histogramme des articles publiés entre 1990 et 2019 [18] .....	18
Figure 1-13 Les méthodes de résolution utilisée dans FJSP [18] .....	19
Figure 2-1 Disposition du système flexible en ligne.....	27
Figure 2-2 Disposition en Loop. ....	27
Figure 2-3 Disposition rectangulaire du FMS.....	28
Figure 2-4 Disposition de l'échelle du FMS.....	28
Figure 2-5 Disposition en champ libre du FMS.....	29
Figure 2-6 Disposition centrée du FMS.....	29
Figure 2-7 Le cercle du CIM de base pour une entreprise de production classique. ....	32
Figure 3-1 Organisation du système étudié.....	43
Figure 3-2 Diagramme de Gantt trouvé utilisent la règle SPT.....	45
Figure 3-3 Diagramme de Gantt trouvé utilisent la règle EDD. ....	46
Figure 3-4 Diagramme de Gantt trouvé utilisent la recherche locale. ....	46
Figure 3-5 les critères de performance trouvé par chaque règle. ....	47
Figure 3-6 les makespan obtenus par chaque règle.....	47
Figure 3-7 La démarche suivie dans la résolution. ....	48
Figure 3-8 L'organigramme d'algorithme proposé.....	51
Figure 4-1 Configuration du système FMS.....	54
Figure 4-2 Représentation des stations de traitement .....	54
Figure 4-3 Représentation des jobs et la station d'entrée. ....	55
Figure 4-4 Représentation du sous modèle Job 1.....	55
Figure 4-5 Fenêtre de dialogue des module ReadWrite.....	56
Figure 4-6 Représentation du sous modèle 7. ....	56
Figure 4-7 Représentation des routage suivés par chaque job. ....	57
Figure 4-8 Représentation de la station de sortie.....	57
Figure 4-9 Diagramme de Gantt trouvé utilisent LEKIN .....	58
Figure 4-10 Temps de fin de la dernière tache .....	58
Figure 4-11 Modélisation avec le temps de manutention. ....	59
Figure 4-12 Le makespan trouvé ajoutons le temps de manutention.....	59
Figure 4-13 Diagramme de Gantt avec temps de transport.....	60
Figure 4-14 Dysfonctionnements qui se sont produits dans le système.....	60
Figure 4-15 Les taux d'utilisation des machines.....	61
Figure 4-16 les temps de fin de chaque Job. ....	62
Figure 4-17 Changement de routage des pièce 5 et 2. ....	65

Figure 4-18 Changement de routage des pièce 4 et 3. ....	68
Figure 4-19 Changement de routage des pièce 6 et 5. ....	70
Figure 4-20 Représentation de station 1 après l'implantation d'algorithme. ....	71
Figure 4-21 représentation de la première condition. ....	71
Figure 4-22 représentation de la deuxième condition. ....	72
Figure 4-23 Les nouveaux séquences ajoutées au simulation. ....	72
Figure 4-24 Le makespan trouvé par la simulation. ....	72
Figure 4-25 taux d'utilisation des machines. ....	73
Figure 4-26 temps d'achèvement des pièce sans et avec le réordonnement. ....	74

## *Liste des tableaux*

Tableau 1-1 L'ensemble des heuristiques utilisées .....	14
Tableau 1-2 Fonctions objectif connues [19].....	19
Tableau 2-1 Différentes façons d'atteindre la flexibilité .....	24
Tableau 2-2 Les tâches liées a chaque Niveau.....	36
Tableau 3-1 Les temps de traitements de chaque tâche par machines.....	43
Tableau 3-2 Table d'affectation. ....	44
Tableau 3-3 Les routage de chaque pièce. ....	47



## *Introduction générale :*

Parallèlement au développement de la mondialisation et de systèmes de production plus flexibles, le monde industrialisé d'aujourd'hui connaît une énorme demande de produits personnalisés de meilleure qualité, à des prix plus bas et dans des délais de livraison plus courts. Cela pose des défis à de nombreuses pratiques de fabrication, en particulier la gestion des ateliers, qui joue un rôle important dans le développement de l'industrie et le raccourcissement des délais de production.

Si un système de production peut garantir la production simultanée de différentes quantités de différents types de pièces, et peut s'adapter à la production de nouveaux produits que le système n'a pas conçus, alors il s'agit d'un système de production flexible.

La productivité est directement affectée par la qualité de la planification des machines, car la production peut produire une variété de produits à des prix inférieurs grâce à une utilisation plus efficace des ressources. L'application de l'ordonnancement est très étendue : par exemple, la gestion de la charge des processus dans l'informatique, la gestion de la production dans l'industrie et dans la gestion de projet.

La résolution d'un problème d'ordonnancement de type Job Shop Flexible constitue une forte combinaison de problèmes, et il est toujours actualisable, car il n'existe pas encore de solution définitive.

Dans cette perspective, ce projet de master propose une étude basée la modélisation, la simulation et le développement d'un algorithme pour résoudre le problème d'ordonnancement de type Job Shop Flexible (JSF). Au sein des ateliers de ce type, il y a plusieurs jobs à exécuter par plusieurs machines. Mais l'exécution de chaque Job se traduit par l'exécution de plusieurs tâches ou opérations, Les opérations du Job Shop peuvent être traitées sur différentes machines.

Dans notre exemple, il s'agit d'un atelier de travail flexible, ce qui signifie que non seulement les opérations sont traitées sur des machines différentes, mais que chaque opération a plusieurs alternatives pour le traitement, donc le temps d'exécution de chaque opération cela dépend de la machine candidate, Avec une contrainte d'indisponibilité des machines.

Dans notre étude, nous avons retenu comme un critère de performance le  $C_{max}$  .

La structure de cette mémoire est la suivante :

- Dans le chapitre 1, nous présentons la production et la gestion de production avec ses différents types et son rôle et les systèmes de production existants. Puis nous parlons sur les généralités d'ordonnancement et ses divers problèmes. Nous poursuivons par les différents types d'ateliers. Puis, les méthodes de résolution (exactes et approchées).

Et fini par un état de l'art sur les méthodes de modélisation trouvées dans les littératures.

- Dans le chapitre 2, nous présentons le problème d'ordonnancement de type job shop flexible FJSP et sa formulation classique et nous représentons le modèle qui nous prenons comme un exemple à étudier et l'algorithme que nous avons proposé pour réordonner les tâches en cas de déclenchement d'une panne (contrainte d'indisponibilité).
- Le chapitre 3 est consacré pour la simulation sous Arena de notre modèle étudié avec l'indisponibilité de machines.

---

# **Chapitre I :**

## **Généralités et littératures**

---

## 1.1 Introduction :

Quelle que soit la zone de production, tant les coûts de production que les délais de livraison représentent deux fonctions déterminantes pour l'efficacité et la compétitivité des entreprises ; ces deux fonctions sont étroitement liées à la qualité de la programmation utilisée. Que les problèmes d'ordonnancement deviennent de plus en plus importants dans le monde des systèmes de production.

Dans ce chapitre introductif, nous essayons d'abord d'associer le concept d'ordonnancement à la gestion de la production, puis introduisant le concept de base d'ordonnancement en atelier, sa représentation et ses méthodes d'optimisation. La partie suivante concerne différents types d'ateliers de production. Nous expliquerons les systèmes flexibles de production et sa complexité.

Ce chapitre se termine par un état de l'art et une description détaillée de l'ordonnancement d'ateliers Job Shop flexible.

## 1.2 Production :

### 1.2.1 Définition de la production :

La production constitue le principal élément de toute activité industrielle [1]

Selon "Anil kumar 2008" [2], La notion de fonction de production désigne la partie d'une organisation qui s'occupe de la transformation d'une série d'intrants en extrants (produits) répondant aux exigences de qualité. La production peut se définir de la manière suivante :

« *The step-by-step conversion of one form of material into another form through chemical or mechanical process to create or enhance the utility of the product to the user.* » [2]

La figure suivante représente un schéma général d'un système de production :

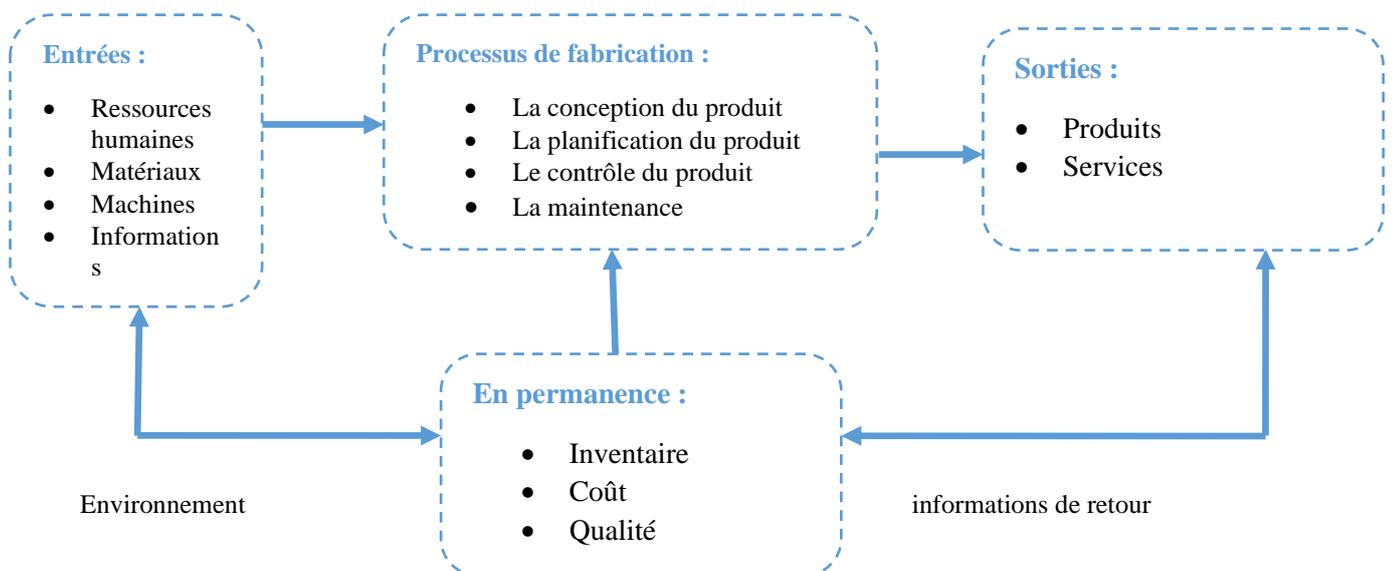


Figure 1-1 Schéma du système de production [2]

### 1.2.2 Type de production :

D'après "G. Javel" [3] il existe il 8 types de la production :

- Production continue.
- Production discontinue.
- Production unitaire.
- Production par lot.
- Production en masse.
- Production à la commande.
- Production pour le stockage.
- Production mixte.

### 1.2.3 Gestion de production :

La gestion de la production permet de planifier, d'organiser, de diriger et de contrôler les opérations de la production. Cette gestion associe et transforme les différentes ressources qui sont utilisées dans le sous-système de production de l'organisation en produits à forte valeur ajoutée sous contrôle, en accord avec les politiques de l'organisation. [2]

### 1.2.4 Le rôle de la gestion de production :

- Appliquer la stratégie retenue par les propriétaires ou par le conseil d'administration.
- Optimiser le retour sur investissement.
- Mettre en œuvre de façon efficace les moyens humains, matériels et financiers. [4]

### 1.2.5 Les systèmes de production :

Le système de production est la partie d'une organisation responsable de la fabrication de ses produits.

Il s'agit de l'activité au cours de laquelle les ressources, passant dans un système précis, sont associées et traitées de façon contrôlée pour créer de la valeur ajoutée en conformité avec les politiques définies par la direction. [2]

Les systèmes de production peuvent caractériser par un objectif, la transformation des inputs divers en outputs utiles, un feed-back sur les activités, élément essentiel pour contrôler et améliorer les performances du système. [2]

### 1.2.6 Le système de production de type job shop :

#### a) Définition

Nommé aussi atelier à cheminements multiples. Se caractérisent par la production d'une ou de quelques quantités de produits élaborés et fabriqués conformément aux exigences des consommateurs en respectant des délais et des coûts prédéfinis. Elle se caractérise par un faible volume et une grande variété de produits. [2]

#### b) Caractéristiques :

Le système job shop a :

- Une variété élevée de produits et un volume faible.
- Utilisation de machines générale.
- Des travailleurs très compétents qui sont capables de faire face à chaque tâche comme un véritable défi à cause de son unicité.
- Inventaire important de matériaux, d'outils et de pièces.
- Une planification précise est indispensable afin de séquencer les besoins de chaque produit, les aptitudes de chaque pôle de travail et les ordres de priorité. [2]

c) Avantages

- Les machines et les installations à usage général permettent de fabriquer une grande variété de produits.
- Les opérateurs gagneront en qualification et en compétence, puisque chaque job leur fournit des possibilités.
- Il y a des opportunités pour utiliser des techniques innovantes et des idées novatrices. [2]

d) Limitations :

- Coût plus élevé dû aux fréquents changements de réglage.
- Un stock plus élevé à tous les niveaux et par conséquent un coût de stock plus important.
- Planification compliquée.
- Espace exigé plus vaste. [2]

### 1.3 Ordonnancement :

#### 1.3.1 Généralité sur l'ordonnancement :

##### 1.3.1.1 Définition :

À partir de la multiplicité des notions d'ordonnancement présentées dans la littérature, l'ordonnancement peut définir comme suit :

*« It is a function to determine an actual (optimal or feasible) implementation plan as to the time schedule for all jobs to be executed; that is, when, with what machine, and who does what operation » [5]*

*« Scheduling concerns the allocation of limited resources to tasks over time. » [6]*

*« (...) scheduling in a manufacturing environment is the process of deciding what happens when and where. » [7]*

*« Scheduling occurs in a very wide range of economic activities. It always involves accomplishing a number of things that tie up various resources for periods of time. The resources are in limited supply. » [8]*

L'ordonnancement est l'affectation temporelle de tâches à des ressources limitées qui sont utilisées. Les ressources qui sont utilisées pour accomplir les tâches. La représentation d'une telle affectation est appelée un planning. [9]

L'ordonnancement est l'allocation d'un ensemble de machines et d'autres ressources clairement déterminées à un ensemble de jobs données, constituées d'opérations, en fonction de certaines contraintes prédéterminées. Afin d'obtenir un résultat optimal. Une instance de problème consiste en un ensemble de  $m$  machines, un ensemble de  $n$  jobs à traiter séquentiellement sur toutes les machines, où chaque opération est exécutée sur exactement une machine ; ainsi, chaque job est un ensemble d'opérations associées chacune à une machine.

Job shop : où les tâches sont exécutées de manière séquentielle, mais avec une séquence de traitement spécifique pour chaque tâche. [10]

### 1.3.2 Les classes d'ordonnancement :

Il est possible d'identifier plusieurs types d'ordonnancement ces catégories sont utilisées pour :

- Diminuer le nombre de planifications possibles, et donc l'effort de recherche de solutions bonnes ou optimales comparativement à un ensemble continu de solutions.
- Identifier les propriétés de l'espace de solution et/ou les bonnes solutions ou les solutions optimales pour adapter les méthodes de solution en conséquence.

Les classes d'ordonnancement qui sont envisageables sont les suivantes :

#### a) Ordonnancement sans délai :

Un ordonnancement qui n'a pas de temps mort imprévu sur n'importe quelle machine.

(Il n'y a pas d'opération en attente pendant le temps où la machine affectée à cette opération est libre pour le traitement de celle-ci).

#### b) Ordonnancement actif :

Un ordonnancement est actif, si l'on ne peut pas lancer une opération avant la date prévue sans qu'au moins une autre opération de ce programme ne soit retardée.

(Les ordonnancements sans délai sont actifs tandis que le contraire n'est pas vrai).

#### c) Ordonnancement semi actif :

Un ordonnancement est semi actif lorsqu'aucune opération ne peut se terminer plus tôt sans modifier le déroulement du traitement sur n'importe laquelle des machines.

(Un ordonnancement actif est forcément semi actif).

#### 1.3.2.1 Formulation d'un problème d'ordonnancement :

Un modèle d'ordonnancement est une sorte d'abstraction formelle d'un problème de prise de décision d'ordonnancement qui est décrit en tenant compte du système de **tâches/opérations**, des **contraintes** de traitement et des **critères**. [11]

### 1.3.2.1.1 Les tâches :

Une tâche est une entité de travail de base localisée dans le temps avec une date de début  $t_i$  et/ou une date de fin  $c_i$ , et caractérisée par une durée  $p_i$ , ( $c_i = t_i + p_i$ ). Ainsi que par l'intensité  $a_i^k$  avec la quelle elle consomme certaines ressources  $k$ . En plus simple, nous considérons que pour chaque ressource nécessaire, cette intensité est maintenue durant l'exécution de la tâche. Dans certains problèmes, les tâches peuvent être exécutées en plusieurs parties, et le fait d'entrelacer les différentes parties (problèmes préemptifs) garantit que les ressources sont aussi actives que possible. Avec d'autres, en contrepartie, on ne peut pas arrêter une tâche qui est lancée (non préemptifs). [12]

### 1.3.2.1.2 Les ressources :

Une ressource  $k$  est un dispositif technique ou humain nécessaire à l'exécution d'une tâche et qui est disponible en quantité limitée

Type de ressource :

- Ressource renouvelable : est disponible à plusieurs reprises en même quantités (espace, équipement, machine, homme, etc.) une fois utilisée par une ou plusieurs tâches.
- Ressource non renouvelable (consommable) : la quantité de ressource utilisable est à chaque instant limitée (budget, matière première, etc.)
- Ressource à double contrainte : son usage momentané et sa consommation globale sont à la fois limités (source d'énergie, de financement, etc.)
- Ressources disjonctives : sont non partageables, elles ne sont capables de réaliser qu'une seule tâche à un moment donné (robot manipulateur, machine-outil)
- Ressource cumulative : peuvent être partagées entre plusieurs tâches en même temps (équipe de travailleurs, poste de travail) si leur capacité est suffisante. [12]

### 1.3.2.1.3 Les contraintes :

Les contraintes indiquent les limitations possibles de l'ensemble des variables de décision, Par ailleurs, les contraintes nous renseignent sur les restrictions qu'impose l'environnement. [13]

Les contraintes peuvent être distinguées en quatre principales classes [14] :

- Contraintes temporelles : présentent les dates des tâches comme disponibilité et délai de livraison, ou la durée totale du projet, ainsi que les contraintes de commande qui déterminent la position relative de certaines tâches par rapport à d'autres tâches.
- Contraintes technologiques : (contraintes de gamme) : Décrire la relation entre l'ordre relatif des différentes tâches.
- Contraintes de ressources :
  1. Contraintes d'utilisation de ressources : Exprimer le type et la quantité de ressources utilisées dans la tâche et les caractéristiques de l'utilisation de ces ressources.

2. Contraintes de disponibilité des ressources : Déterminez le type et la quantité de temps disponible, toutes ces contraintes peuvent être formalisées en fonction de la distance ou du potentiel entre le début de la tâche.

#### 1.3.2.1.4 Les critères d'optimisation :

Ce sont les différents objectifs à optimiser. Selon le nombre d'objectifs on a deux types d'optimisation :

- Optimisation d'un seul critère (mono-objectif)
- Optimisation de divers critères (multi-objectif) [15]

Les critères habituellement appliqués reposent sur certaines grandes catégories susceptibles d'être synthétisées de la manière suivante : [11]

- Critères basés sur l'utilisation : Ce sont des objectifs qui consistent à exploiter au maximum les ressources de production existantes.

Par exemple :

- Maximisation de l'utilisation des machines.
- Réduction des temps morts.
- Réduction des temps de réglage ou de changement.
- Maximiser le nombre de jobs réalisés dans une unité de temps.
- La satisfaction des clients : Ces mesures de performance sont liées au respect des échéances. Par la minimisation du nombre de tâches en retard
- Orientée vers le stockage : le stockage constitue comme une préoccupation majeure,

Les objectifs liés aux stockages sont :

- Réduction des travaux en cours.
- Réduction de la durée des files d'attente entre les machines.
- Orientation vers les coûts :  
Les lots importants sont habituellement plus rentables en raison des économies d'échelle. Plusieurs autres mesures et décisions visant à réduire les coûts de production sont envisageables.
- Juste à temps : La production juste-à-temps requiert que les tâches soient terminées précisément à leur date prévue, ni trop tôt, ni trop tard.

#### 1.3.3 Notation des problèmes d'ordonnement :

Le système de notation qui est utilisé pour représenter les problèmes d'ordonnement est  $|\beta|\delta$ .

Le champ  $\alpha$  : Fournir des informations sur l'environnement de la machine (type d'atelier et nombre de machine).

Le champ  $\beta$  : Fournir des informations sur les caractéristiques des tâches et les contraintes

(Date d'arrivée, précedence).

Le champ  $\delta$  : Fournir des informations sur le critère à optimisé.

#### 1.4 Les types d'ateliers de production :

Généralement les problèmes d'ordonnancement correspondant à  $n$  jobs sur  $m$  machines se classent en trois principales catégories. Le flux opérationnel des tâches (ordre de passage) détermine le type de tâche comme étant l'un des suivants [16] :

##### 1.4.1 Seule machine :

Dans le plus simple des modèles d'ordonnancement, nous avons  $n$  jobs  $J_1, \dots, J_n$  avec des temps de traitement  $p_j (j = 1, \dots, n)$  qui doit être traité sur un seul et unique processeur. Par ailleurs, des contraintes de précédence sont parfois données. [17]

La disposition de la production est formée par une seule machine. Par conséquent, chaque tâche est traitée une fois exactement par cette machine. Il n'y a pas vraiment de routes de traitement. [11]



Figure 1-2 Schémas d'une seule machine.

##### 1.4.2 Machines en parallèle :

A la place d'un seul processeur, nous pouvons avoir  $m$  processeurs  $P_1, \dots, P_m$  sur lesquels les tâches à traiter. [17]

Le schéma de flux d'une machine parallèle est aussi simple. Les tâches arrivent à l'atelier, sont assignées et traitées sur l'une des  $m$  machines, puis elles sortent de l'atelier. [11]

Les modèles de machines parallèles peuvent être classés en trois types [11]:

- Machines parallèles identiques : ou le temps de traitement de chaque tâche ( $p_j$ ) est indépendant de la machine à laquelle elle est affectée.
- Machines parallèles uniformes (machines à vitesses différentes) : des machines peuvent être plus ou moins rapides selon un rapport constant pour tous les jobs.
- Machines parallèles non liées : Les machines sont censées être toutes différentes les unes des autres.

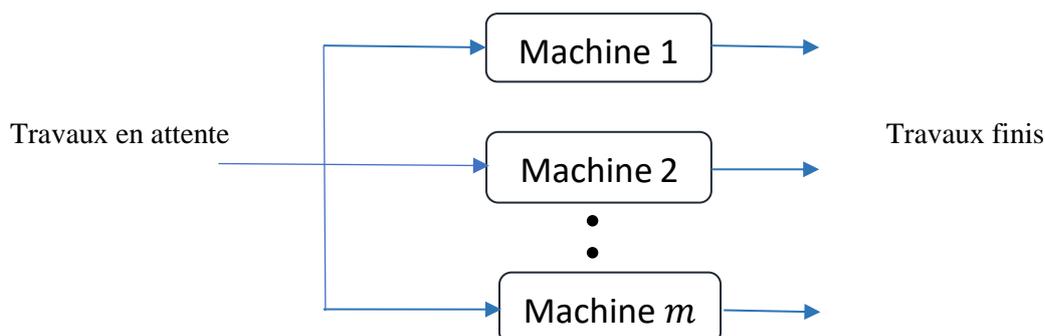


Figure 1-3 Schémas des machines parallèles.

### 1.4.3 Flow shop :

(Atelier à cheminement unique) où tous les jobs sont traités de manière séquentielle et où la séquence de traitement est la même sur toutes les machines. [10]. Il existe  $m$  machines, mais à la place de la disposition en parallèle, elles sont placées en série. On considère généralement que les machines ont chacune une utilité particulière. [11]

Un problème de flow-shop se présente comme un cas particulier de job-shop avec  $n_j = m$  opérations. Pour  $j = 1, \dots, n$  où l'opération  $O_{ij}$  doit être traitée sur  $p_j$  (les tâches doivent être réalisées dans un ordre identique sur tous les processeurs). [17]



Figure 1-4 Schéma d'un atelier de type flow shop.

### 1.4.4 Open shop :

Un problème d'ordonnancement de type open-shop est similaire à celui d'un flow-shop sauf que les opérations n'ont pas de relations de primauté entre elles. [17]

La différence majeure est que le déroulement du traitement de chaque tâche n'est pas fixé, puisqu'il faut le déterminer au cours du processus d'ordonnancement. [11] La disposition dans un open shop est la plus générale et complexe des ateliers. Il existe  $m$  machines en séries et  $n$  tâches qui doivent passer par les  $m$  machines. [17]

### 1.4.5 Job shop :

Le job shop comprend des machines d'usage général disposées dans différents départements. Chaque job nécessite des exigences techniques précises et exige un traitement sur des machines dans un enchaînement déterminé [2]. Où les tâches sont exécutées de manière séquentielle, mais avec une séquence de traitement spécifique pour chaque tâche. [10]

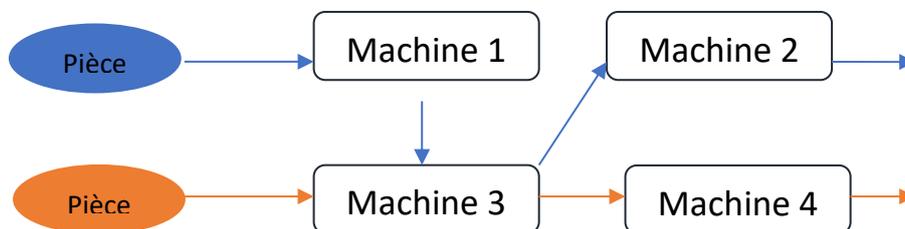


Figure 1-5 Schéma d'un atelier de type job shop.

## 1.5 Représentation des problèmes d'ordonnement

### 1.5.1 Le diagramme de Gantt (tableaux de bord) :

Les diagrammes de Gantt et les tableaux de planification connexes ont été largement utilisés comme dispositifs de planification au passé et sont particulièrement simples à appréhender et permettent d'indiquer rapidement à toutes les parties concernées la situation actuelle ou prévue. En général dans un diagramme de Gantt, les opérations sont toutes représentées par une segmentation placée dans le temps, proportionnelle à la période de fonctionnement de l'opération (Figure 1-6), Sont utilisés sous diverses formes :

- Les diagrammes d'ordonnement ou d'avancement.
- Les tableaux de charge.
- Le tableau d'enregistrement. [2]

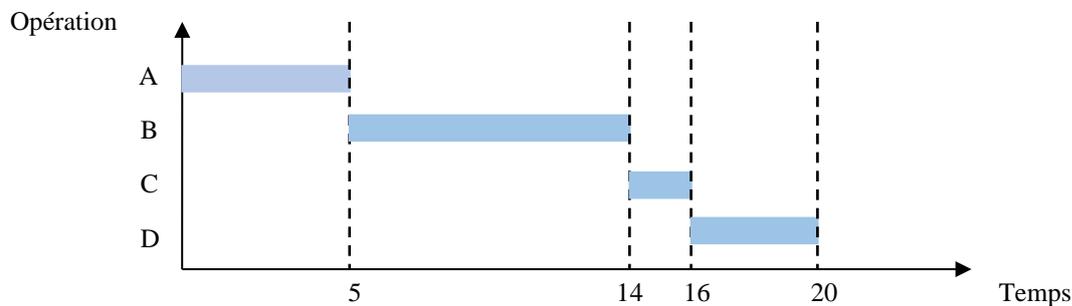


Figure 1-6 Diagramme de Gantt

### 1.5.2 Graphe Potentiel-Tâches :

Le développement de cet outil graphique est lié à la théorie des réseaux de Petri, qui sont principalement utilisés pour simuler des systèmes dynamiques avec des événements discrets. Dans ce type de modélisation, les nœuds représentant les tâches et les arcs représentant les contraintes (figure) et qui ont 2 types sont :

- Arcs conjonctifs : représenter les contraintes de précédence et indiquez la durée de la tâche.
- Arcs disjonctifs : représenter les contraintes des ressources.

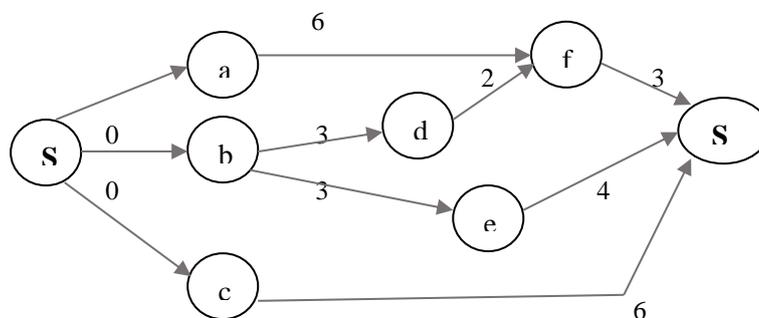


Figure 1-7 Exemple d'un Graphe potentiel-tâches.

### 1.5.3 Méthode PERT : (technique d'évaluation et d'examen de programmes)

Dans cette vue, similaire à la vue précédente, Nous pouvons représenter la tâche sous la forme d'un arc avec un numéro associé qui indique la durée de la tâche. Ou plusieurs tâches. Les cercles sont numérotés dans l'ordre suivant différents événements.

### 1.6 Règles de priorité :

Les règles de priorité sont des critères pour décider de passer une commande ou l'une des commandes multiples dans le processus. Ce sont donc les règles de priorités standard utilisées dans la planification et l'ordonnancement de la production.

- **FIFO** : basé sur le principe suivant : la première tâche qui arrive est la première tâche ordonnancée.
- **SPT** : La tâche avec le temps de traitement le plus court est prioritaire.
- **LPT** : La tâche avec le temps de traitement le plus long est prioritaire.
- **EDD** : La tâche avec la prochaine date d'achèvement promise est prioritaire.

### 1.7 Méthodes d'optimisation :

La complexité de la résolution des problèmes d'optimisation a conduit les chercheurs à proposer plusieurs méthodes. Traditionnellement, les problèmes d'optimisation sont résolus avec des méthodes précises, mais lorsque l'échelle du problème devient plus grande, il est difficile de trouver la solution optimale dans un grand espace. Dans un délai raisonnable, car il faut beaucoup de temps pour explorer pleinement l'espace des solutions. Pour cette raison, les chercheurs ont choisi différents types de méthodes de résolution, les méthodes dites d'approximation. Ces dernières méthodes basées sur l'étude de l'espace des solutions sont plus rapides que celles utilisées dans les méthodes précises qui peuvent fournir des solutions quasi optimales. Dans un délai acceptable.

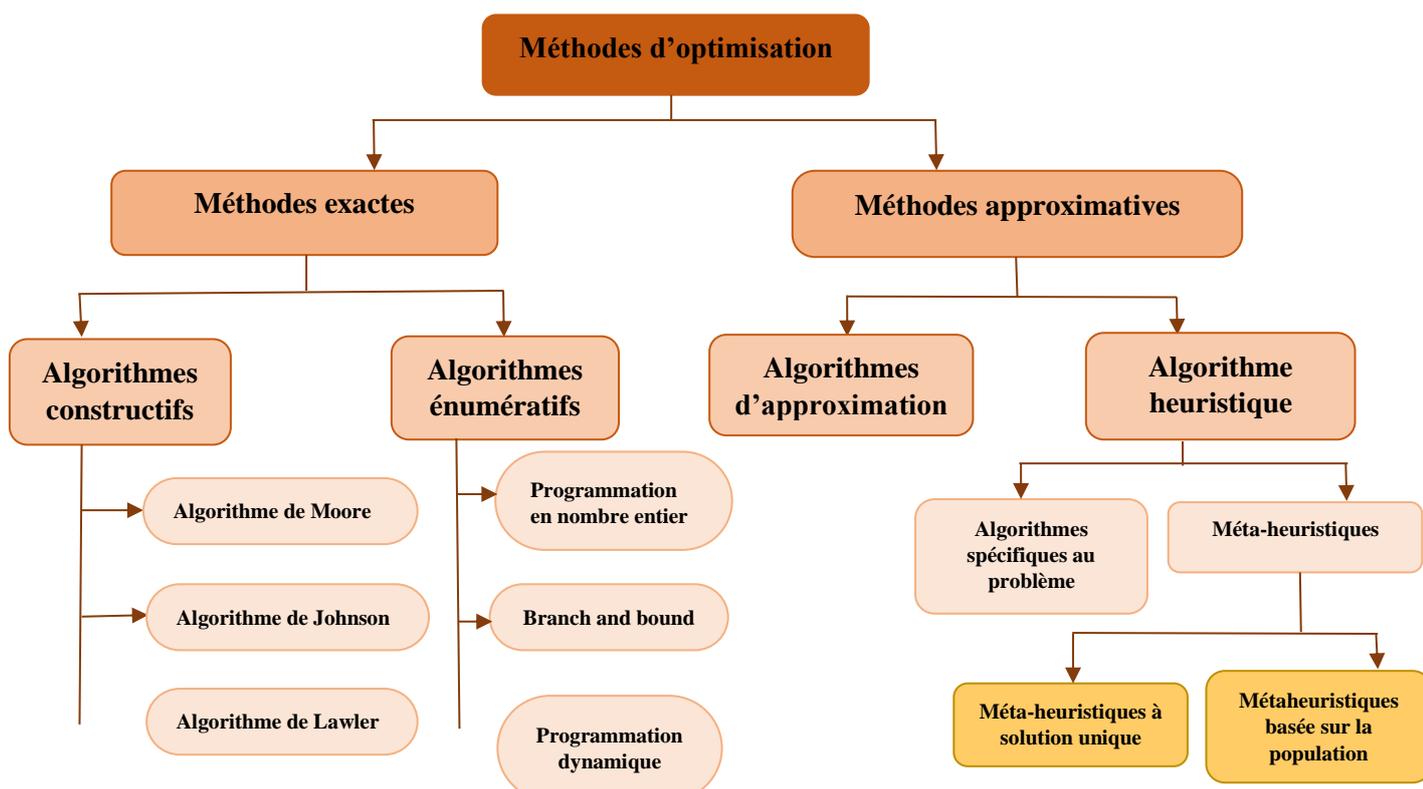




Figure 1-8 Différentes méthodes d'optimisation

### 1.7.1 Méthodes exactes :

D'après [11], Il y a deux sortes d'algorithmes exacts pour résoudre les problèmes d'ordonnancement : Algorithmes constructifs exacts et algorithmes énumératifs.

#### 1.7.1.1 Algorithmes constructifs exacts :

- L'algorithme de Johnson :

L'algorithme de Johnson utilise des arcs pondérés pour calculer le chemin le plus court entre toutes les paires de nœuds dans un graphe orienté. S'il n'y a pas de chaîne de poids négative, le poids de l'arc peut être négatif. Il est particulièrement efficace lorsque la carte est creuse.

- L'algorithme de Lawler :

L'algorithme de Lawler est une méthode puissante pour résoudre de nombreux problèmes de programmation limités. L'algorithme considère toutes les restrictions de priorité. Planifiez une série de tâches pour entrer dans le processeur en même temps, avec des restrictions de priorité pour minimiser la latence ou maximiser la vitesse. Lorsque certaines tâches doivent être terminées avant que d'autres ne commencent, des contraintes de priorité apparaissent.

- L'algorithme de Moore :

L'algorithme de minimisation de Moore est un algorithme qui calcule le plus petit automate fini entièrement déterministe correspondant à un FSM donné. Il est attribué à Edward F. Moore. L'algorithme est facile à décrire, facile à programmer, efficace en moyenne, et dans le pire des cas, apparaît dans les manuels classiques d'informatique théorique.

#### 1.7.1.2 Algorithmes énumératifs :

- La programmation en nombre entier :

C'est un domaine des mathématiques et des calculs théoriques dans lequel les problèmes d'optimisation sont traités d'une manière particulière. Ces problèmes sont décrits par des fonctions de coût et des contraintes linéaires et des variables entières. L'intégrité variable d'OLNE, différente de l'optimisation linéaire classique, est nécessaire pour modéliser certains problèmes, notamment algorithmiques, mais cette contrainte supplémentaire complique la tâche et nécessite des méthodes particulières.

- Branch and bound (séparation et évaluation):

C'est une méthode générale pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire.

Dans l'optimisation de la combinaison, un point a été trouvé qui minimise la fonctionnalité appelée coût dans le taux de facturation. Une façon naïve de résoudre ce problème est de lister toutes les solutions au problème, de calculer le coût de chaque solution, puis de donner la valeur minimale. En analysant que la nature du problème est une mauvaise solution, c'est-à-dire la solution impossible à minimiser, on ne peut pas lister les solutions que l'on connaît. La méthode générale pour cela est la méthode de séparation et d'évaluation. Cette

méthode est souvent utilisée pour résoudre des problèmes NP-complets, qui sont considérés comme difficiles à résoudre efficacement.

- La programmation dynamique :

La programmation dynamique est une méthode algorithmique pour résoudre des problèmes d'optimisation. Ce concept a été introduit par Richard Bellman au début des années 1950. A l'époque, le terme « programmation » signifiait ordonnancement et ordonnancement. La programmation dynamique comprend la résolution du problème en décomposant le problème en sous-tâches, puis en résolvant les sous-tâches dans l'ordre du plus petit au plus petit. Le plus grand qui stocke les résultats intermédiaires.

## 1.7.2 Méthodes approchées :

### 1.7.2.1 Les heuristiques :

Ils reposent sur des méthodes empiriques et utilisent des règles plus simples pour optimiser un ou plusieurs critères. Le principe général derrière cette catégorie de méthode est de combiner des stratégies de prise de décision pour créer une solution presque optimale tout en s'efforçant d'avoir un temps de calcul suffisant.

La table suivante énumère les heuristiques :

Heuristique	Description
SPT	La règle de temps de traitement minimum trie les tâches par ordre croissant de temps de traitement. Chaque fois que la machine est libérée, elle commence à traiter le travail le plus court qui est prêt pour ce moment. Cet algorithme est le plus approprié pour déterminer le temps de traitement total et le temps de traitement minimum moyen. Cet algorithme est optimal pour minimiser le temps d'écoulement moyen, minimiser le nombre moyen de travaux dans le système, minimiser le temps d'attente moyen entre l'heure d'arrivée des travaux et le début du traitement, et minimiser les délais maximums et moyens.
LPT	La règle de temps de traitement le plus long trie les travaux par ordre décroissant de temps de traitement. Chaque fois que la machine est libérée, le traitement

	démarre à partir du plus gros travail préparé pour ce moment. Cet algorithme est un algorithme heuristique utilisé pour déterminer la durée minimale du programme. Planifiez les tâches les plus longues en premier pour assurer que les tâches importantes ne sont pas avant la fin du plan et augmentez considérablement le temps nécessaire pour terminer la dernière tâche.
<b>RANDOM</b> (Aléatoire)	Est établie selon une permutation aléatoire. Choisissez n'importe quel job dans la file d'attente avec une probabilité égale. Cette règle est généralement utilisée en tant que référence pour des règles différentes
<b>LWR</b>	Cette règle est une prolongation de la SPT variant qui prend en compte le nombre d'opérations successives
<b>MWR</b>	<b>La tâche planifiée suivante est la première tâche non planifiée avec le plus grand nombre d'activités non planifiées dans l'opération.</b>
<b>MORNR</b>	La prochaine tâche planifiée est la première tâche non planifiée de l'affectation qui contient la plupart des tâches en attente
<b>LRF</b>	L'algorithme sélectionne les opérations qui se sont écoulées depuis l'occurrence des opérations dans les opérations effectuées et crée un temps d'inactivité s'il n'y a pas de tâches disponibles.

Tableau 1-1 L'ensemble des heuristiques utilisées

### 1.7.2.2 Les métaheuristiques :

Les méta-heuristiques sont principalement des algorithmes itératifs randomisés, qui progressent vers la solution optimale globale (autrement dit, la limite globale de la fonction) en échantillonnant la formule de l'objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche et poussent les gens à étudier les caractéristiques du problème pour trouver une estimation de la meilleure solution.

Il y a différents algorithmes méta-heuristiques, depuis la recherche locale simple jusqu'aux algorithmes de recherche globale complexes.

#### 1.7.2.2.1 Recherche locale :

Le terme "recherche locale" désigne une série de métaheuristiques reposant sur le concept de voisinage.

Elle inclut les différentes techniques de descente, et également des métaheuristiques plus complexes ("recuit simulé", "tabou", etc.).

La recherche locale se caractérise essentiellement par une série de méthodes de recherche répétées à partir d'une solution viable, afin de déterminer la solution la plus adaptée.

Le perfectionne de manière continue par l'application de toute une gamme de variations localisées.

### 1.7.2.2.1.1 Recherche Tabou :

La méthode Tabou vise la résolution de l'ensemble des problèmes de nature combinatoire, majoritairement NP-hard, et se base sur la mémorisation afin de résoudre efficacement le cas de l'optimum local. D'une manière générale, cette méthode est un traitement itératif qui commence à partir de la solution initiale et essaie de converger vers une solution optimale se déplaçant à chaque étape de l'espace de recherche. Chaque pas consiste tout d'abord à déterminer un ensemble de solutions proches de la solution actuelle, et ensuite à sélectionner la solution la plus adaptée, même si le choix minimise la croissance de la valeur de la fonction objective.

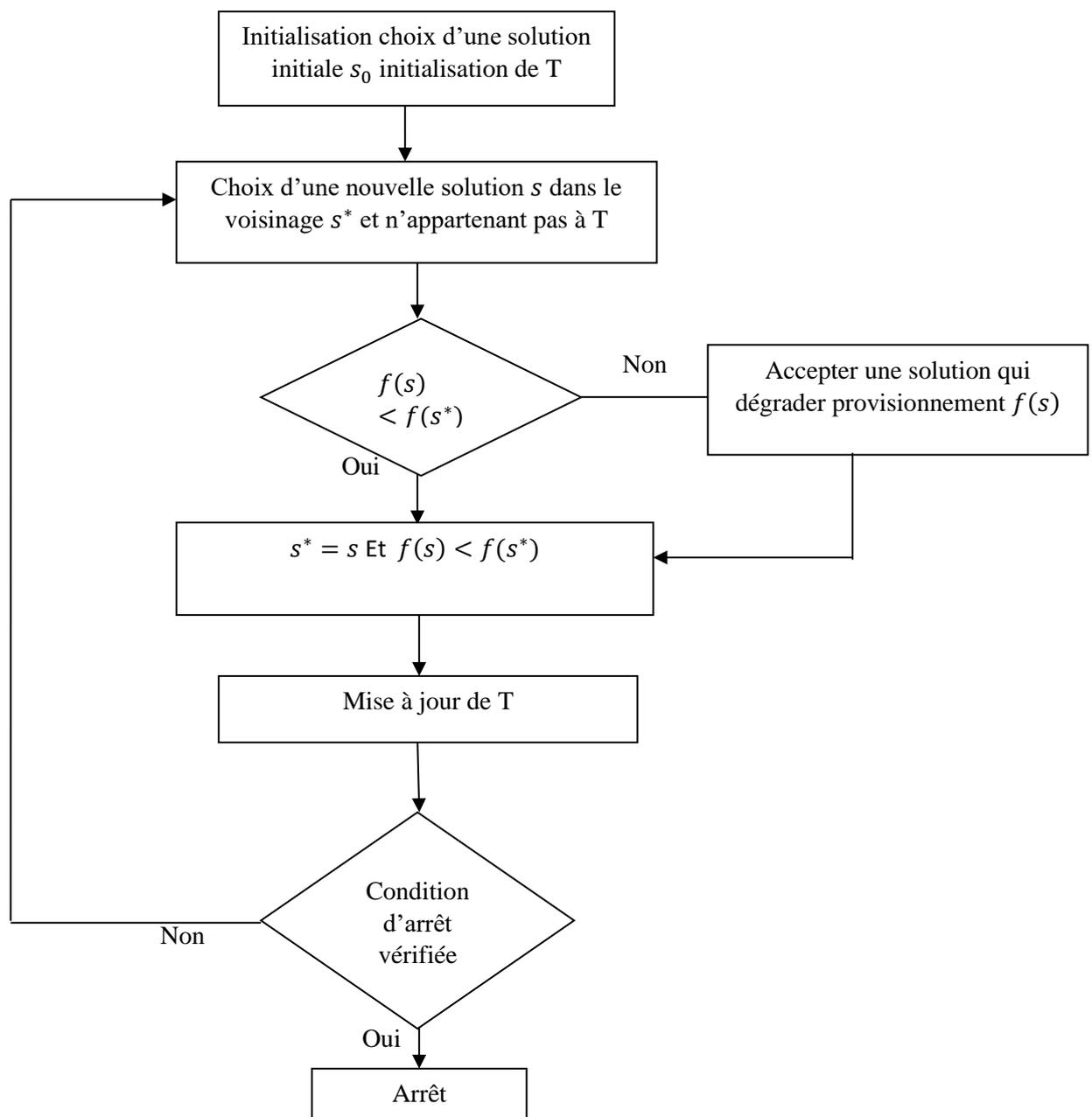


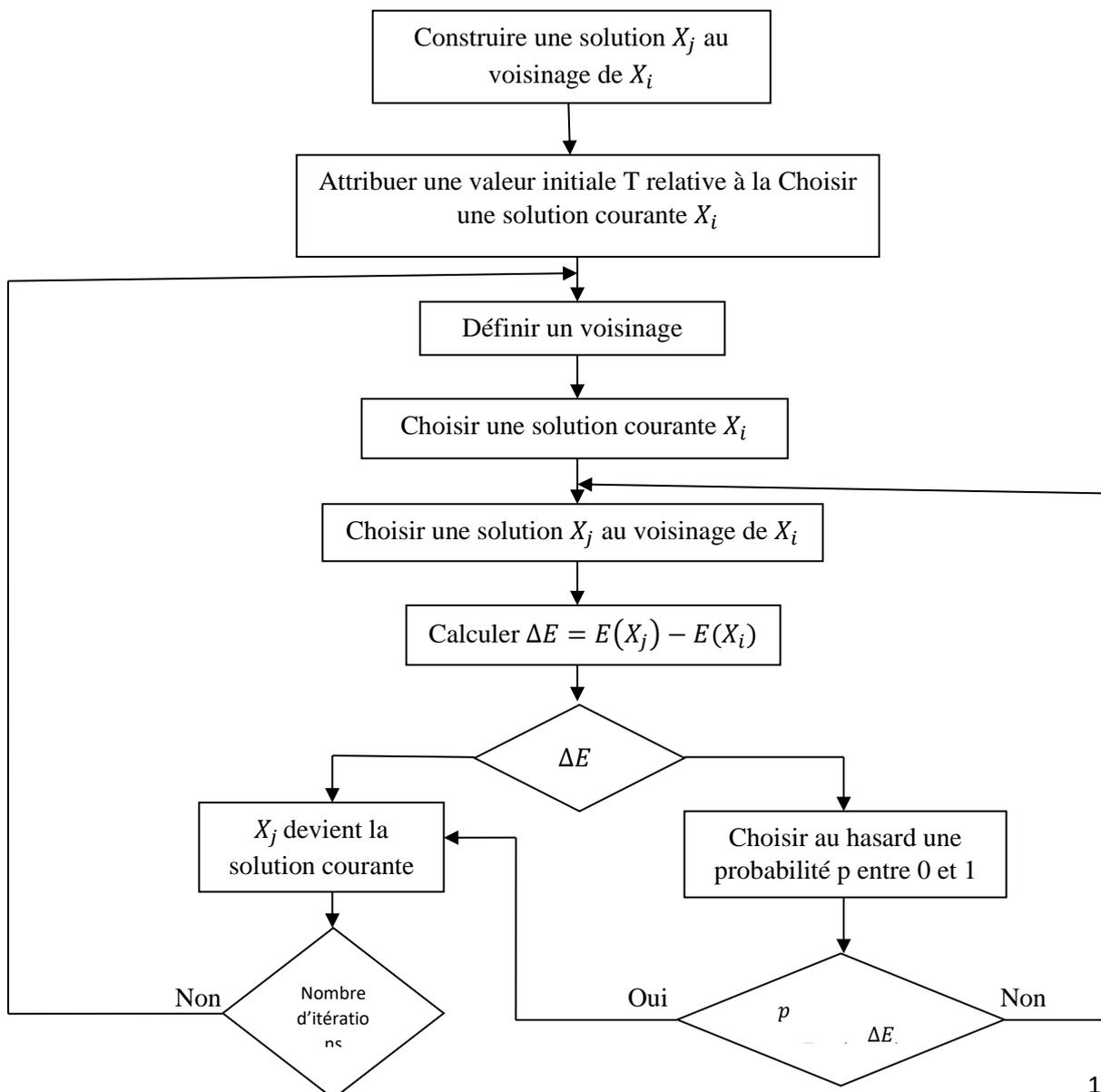
Figure 1-9 Fonctionnement général de recherche tabou

**1.7.2.2.2 Recuit simulé :**

Ce procédé est appliqué notamment en Métallurgie dans le but de perfectionner la qualité du matériau et obtenir un niveau d'énergie minimal correspondant à la structure solide stable. En effet, pour permettre au métal de se rapprocher de la structure idéale du cristal, il est chauffé à haute température puis refroidi doucement pour donner le temps nécessaire aux atomistes de se structurer. Le problème du minimum local est donc résolu.

En particulier, une solution récente plus coûteuse que la solution actuelle ne sera pas obligatoirement écartée, son degré d'acceptation sera aléatoirement fixé en prenant en considération la différence du coût et du niveau de température T. Avec ce paramètre, on estime que plus le traitement d'optimisation est évolué, la proximité des solutions rentables est plus grande ; d'un autre côté, cela permet aux solutions très rentables de commencer par examiner

l'ensemble des solutions possibles, ce qui augmente les opportunités d'être "proche du minimum global".



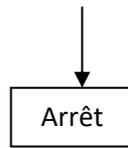


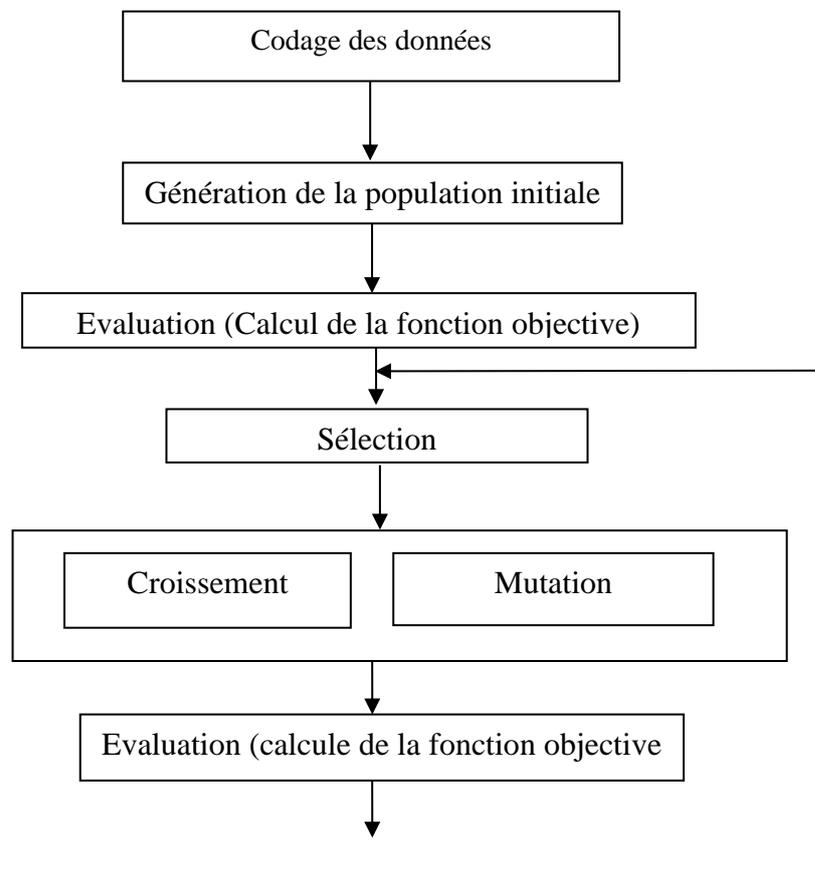
Figure 1-10 Fonctionnement général du recuit simulé

### 1.7.2.2.3 Algorithme génétique :

A l'aide d'algorithmes génétiques, nous avons développé un ensemble de solutions possibles (appelées individus) dans le sens de l'optimisation pour obtenir de meilleures solutions. Chaque solution possible a de nombreuses propriétés qui peuvent être modifiées.

Ces solutions sont généralement exprimées sous forme de chaînes binaires. Mais il est également possible de créer d'autres codes

Généralement, nous commençons avec un groupe d'individus créé au hasard, et il y a un processus itératif. Ce groupe s'appelle une génération à chaque niveau, et la valeur de chaque individu dans le groupe est évaluée à chaque instant la valeur de la fonction objective de la tâche d'optimisation. Les individus les plus appropriés dans la population actuelle sont classés dans un ordre aléatoire, et le génome de chaque individu a été modifié (croisements aléatoires et mutations) pour produire une nouvelle génération. Ensuite, la nouvelle génération sera utilisée lors de la prochaine session. L'algorithme se termine généralement lorsque le nombre maximum de générations est atteint ou qu'un niveau satisfaisant de fitness de la population est atteint.



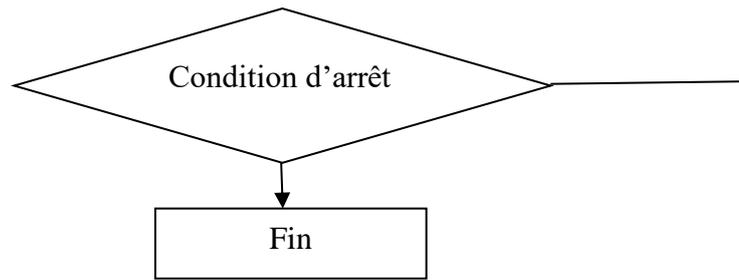


Figure 1-11 Fonctionnement général d'algorithme génétique.

### 1.8 Etat de l'art sur la résolution du FJSP :

L'ordonnancement de la production est l'un des problèmes les plus critiques dans le domaine des systèmes de fabrication et a été largement étudié dans la littérature [18]

C'est dernières 30 années de nombreux livres et articles sont publiés sur FJSP comme la figure 8 représente les documentations les plus citées dans le domaine du FJSP publiées par années durant 30 ans.

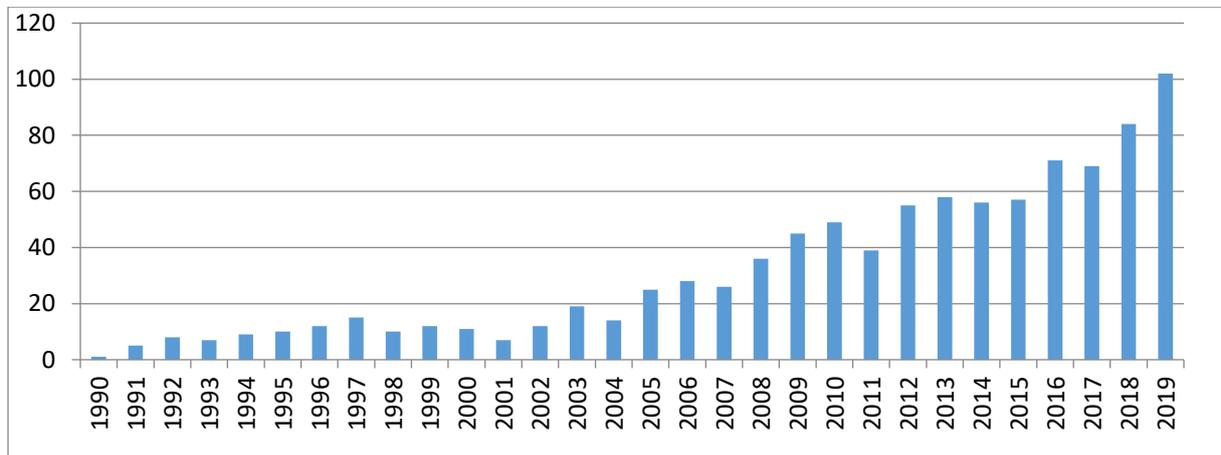


Figure 1-12 Histogramme des articles publiés entre 1990 et 2019 [18]

#### 1.8.1 Mesures de performance :

Le tableau 1 présente les critères de performance autrement dit objectifs :

Mesures de qualité	Symbole	Interprétation
<b>Temps maximal d'exécution</b>	$C_{max}$	Le coût d'un ordonnancement dépend de la durée pendant laquelle le système de traitement est consacré à la totalité des tâches.
<b>Temps moyen d'exécution</b>	$\bar{C}$	Le coût de la planification est directement lié au temps moyen qu'il faut pour réaliser une seule tâche
<b>Temps de passage maximal</b>	$F_{max}$	Le coût est directement lié au job le plus long.
<b>Temps moyen de passage</b>	$\bar{F}$	Le coût est directement lié au temps moyen nécessaire au traitement d'un seul job.

<b>Retard maximum</b>	$L_{max}$	Les coûts de planification sont directement liés à son dernier job.
<b>Retard moyen</b>	$\bar{L}$	Le coût est directement lié à la différence moyenne entre les temps de réalisation et les délais de tous les jobs. Les emplois de départ contribuent en effet à la rémunération, en raison de différences négatives.
<b>Maximum retard</b>	$T_{max}$	Le coût est directement lié au dernier job qui se termine après sa date d'échéance.
<b>Retard moyen</b>	$\bar{T}$	Le coût d'un ordonnancement est directement lié au retard moyen de tous les jobs, les jobs en avance étant considérés comme ayant un 0 retard.
<b>Nombre de jobs en retard</b>	$\sum U_j$	Le coût d'ordonnancement dépend du nombre de jobs qui se terminent après leur date d'échéance.
<b>Avance maximale</b>	$E_{max}$	Le coût d'un planning est directement lié au premier job qui se termine avant sa date d'échéance.

Tableau 1-2 Fonctions objectif connues [19].

### 1.8.2 Méthodes de résolution :

Selon la littérature les chercheurs appliquent plusieurs méthode (exactes et approchés) afin de résoudre le problème d'ordonnancement de type job shop flexible avec des proportions différentes, la majeure partie de la littérature (Figure 1-13)

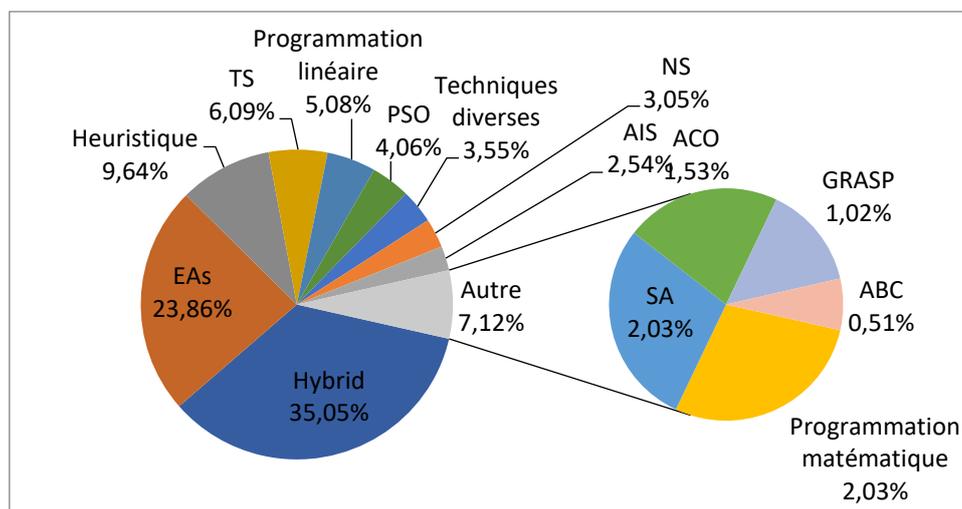


Figure 1-13 Les méthodes de résolution utilisée dans FJSP [18]

Dans la documentation, il existe principalement deux sortes de techniques permettant la résolution (" intégrée " ou " hiérarchique " ) :

La première permet de résoudre les deux sous-tâches du problème-tâche parallèle et la deuxième permet de solutionner les sous-problèmes en même temps.

Il existe plins de travaux dans ce domaine avec plusieurs approches, méthodologies de résolution et fonctions objectives tel que :

- **P. Brunker et R. schlie** : sur la résolution du FJSP avec deux machines par l'algorithme polynomial et optimiser le makespan. [20]
- **P. Brandimarte** : ces travaux est consacré pour les règles de priorité afin de résolu le sous-problème de routage et il utilise la recherche Tabou TS afin de minimiser le makespan et le  $T_{max}$  [21].
- **J. Hurink et al** : sur la résolution du problème avec machine à capacité multiples et utilisent dans cette démarche la recherche Tabou pour minimiser le makespan. [22]
- **Mastrolilli et Gambardella** : sur l'amélioration des techniques de recherche Tabou utilisent le TS amélioré afin de minimiser le  $C_{max}$  [23].
- **Kim et al** : sur la résolution des deux sous problèmes (affectation et séquençage) en parallèle et minimiser le makespan par l'algorithme génétique. [24]
- **Chan et al** : utilisent une approche intégrée de manière itérative pour évoluer les différents niveaux de flexibilité de l'affectation des opérations aux machines (flexibilité totale) par un algorithme génétique et pour minimiser les makespan. [25]
- **Pazzela et al** : utilisent un algorithme génétique et sous approche intégrée et afin de minimiser le makespan, étudient les intégrations de différentes stratégies pour générer la population initiale, sélectionner les individus pour la reproduction [26]
- **Gen et al** : utilisent une approche concurrente étudient la résolution du job shop flexible partielle et totale avec un algorithme génétique pour optimiser les résultats du makespan. [27].
- **De Giovanni et Pazzela** : sur la résolution du FJSP dans un environnement de production décentralisé utilisent un algorithme génétique de la façon intégré pour objectif de minimiser le makespan. [28]
- **Zhong et al** : utilisent dans la résolution deux algorithmes **PSO** (Particle Swarm Optimization) pour résolu l'affectation des opérations aux machines et le séquençage, et le recherche Tabou **TS** pour l'amélioration de séquençement, afin de minimiser le makespan. [29].
- **Lui et al** : utilisent une approche séquentielle et avec un algorithme **VNPSO** (Variable Neighborhood Particle swarm Optimization) pour améliorer la solution d'ordonnancement. [30]
- **Azeb et Naderi** : utilisent dans la résolution deux méthode la première est méthode mathématique exacte **MILP** pour la résolution des problèmes avec petites tailles la deuxième une heuristique gloutonne afin de minimiser le makespan. [31].

## **1.9 Conclusion :**

Ce chapitre peut être divisé en deux parties principales. La première partie du chapitre est consacrée pour présenter des généralités sur l'ordonnancement, nous avons vu, la gestion de production et les principaux problèmes d'ordonnancement ainsi que leurs différentes classes et leurs méthodes d'optimisation divisées en deux catégories qui permettent la résolution de ces problèmes (exactes et approchées), en ce qui a trait aux méthodes exactes, nous mentionnons la programmation dynamique, la programmation linéaire et l'algorithme de Johnson.

Nous avons notamment abordé, au sein des méthodes approchées, les méthodes de recherche locale (recuit simulé ou la méthode de recherche tabou) ainsi que les méthodes évolutionnaires (algorithmes génétiques).

Dans cette partie nous avons défini les différents types d'ateliers de production et l'implantation des machines et l'enchaînement des opérations dans chaque type.

Dans la deuxième partie, nous passons en revue l'état de l'art sur les différentes méthodologies de résolution disponibles dans la documentation. Depuis 30 ans, les chercheurs tentent de concevoir des approches de résolutions effectives

---

# **Chapitre II :**

## **Systemes flexibles et Job Shop Flexible**

---

## 2.1 Introduction :

Aujourd'hui, augmenter la productivité tout en réduisant les coûts est l'objectif premier de toutes les entreprises. Ils sont confrontés à une concurrence accrue, à une pression accrue de leur environnement pour créer des produits innovants et à une offre accrue par rapport à la demande. Dans un secteur industriel très concurrentiel, les grandes unités de production deviennent de moins en moins compétitives car elles s'adaptent mal aux évolutions du marché. Ces unités disparaissent progressivement pour laisser place à de nouvelles structures industrielles au concept différent :

Le système de fabrication flexible ce système se compose d'un ensemble de machines de fabrication programmables intégrées à un équipement de traitement automatisé et contrôlées par un contrôleur central pour fabriquer différentes pièces avec la même productivité, la même taille de lot et la même quantité.

Un aspect des systèmes de fabrication flexibles avec des ressources limitées, des pannes d'équipement aléatoires ou des critères de fabrication multiples est que les problèmes de planification dans ces systèmes sont souvent complexes.

Ce chapitre aborde les principaux aspects relatifs aux systèmes flexibles de production et particulièrement le système job shop flexible, Pour ce faire, nous rappelons la définition de la flexibilité, la réactivité et la robustesse, puis étudions les éléments des systèmes de fabrication flexibles, leurs différents modèles et leur implémentation.

## 2.2 Systèmes flexibles de production :

Les établissements de production ont deux objectifs opposés : à flexibilité et la productivité

- La flexibilité correspond à la réalisation d'un éventail de produits différents au sein d'un atelier de fabrication où les opportunités de variation de la productivité sont réelles.
- La productivité désigne une vitesse de production très élevée, similaire à celle observée sur une chaîne de montage. [16]

Le FMS (Flexible Manufacturing System) est une technologie conçue pour rendre plus flexible l'ensemble de l'outil de fabrication, c'est-à-dire pour se préparer aux différentes évolutions de l'environnement sans démarrer un nouvel outil. Dans le produit de l'équipe, Ou une grande perte de temps, consiste à utiliser des ressources très limitées pour effectuer de nombreuses opérations hétérogènes.

Le concept de "flexible" correspond à la possibilité d'adaptation et à la facilité d'utilisation du système de production.

Flexibilité de la machine	Flexibilité de la manutention	Flexibilité de l'atelier	Flexibilité de la production	Flexibilité du système de production
Aptitude à ce qu'une machine exécute différentes tâches ou produise	Un système de manipulation informatisé facilitant le transport des	Possibilité donnée à un entrepôt de pouvoir faire face, en un temps	Il s'agit d'une technique de production automatique,	Nombre de machines-outils indépendantes dans une chaîne de

divers genres de produits.	produits entre différents stations de production.	restreint, à une modification imprévue de la production. (Changement du rythme de fabrication, changement de produit au cours du processus de fabrication).	assistée par ordinateur, qui permet de produire des pièces très variées.	fabrication, connectées entre elles par des systèmes de traitement automatisés et susceptibles de manipuler une large gamme de produits sans aucune interaction avec le personnel.
----------------------------	---	---	--	--

Tableau 2-1 Différentes façons d'atteindre la flexibilité

Selon [32],

Définition 1 : Un système flexible de production (SFP) est un système de manufacture où l'on retrouve des centres de machines à commande numérique ainsi qu'un dispositif de traitement des matériaux fonctionnent conjointement sous commande informatique.

Définition 2 : Un système flexible de production (SFP) est un dispositif de production pouvant fabriquer une variété de types de produits, composé de machines-outils CNC ou NC raccordées par un système de manipulation automatisé. Le pilotage de l'ensemble du système est assuré par ordinateur.

### 2.2.1 Flexibilité :

Le terme "flexibilité" est tiré du terme latin "pliable". D'autres notions sont «ajustable» et "mobile". Industriellement parlant, le mot signifie adaptable et capable de changer.

L'adjectif flexible ne s'est appliqué aux systèmes de fabrication qu'à la fin des années 1960 et au début des années 1970, lorsqu'il a été appliqué à plusieurs systèmes de fabrication intégrés innovants conçus pour répondre à des besoins spécifiques. Elle est applicable à plusieurs nouveaux systèmes de fabrication intégrés développés à cette époque. [33]

Ce concept a suscité l'intérêt des ingénieurs de production et des chercheurs. [16]

La flexibilité peut définir comme suivant : [16]

Modifications du produit	Modifications du système de production	Modifications de la demande
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Améliorations</li> <li>• Nouveaux éléments constitutifs</li> <li>• Diverses versions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nouvelles installations et techniques de fabrication,</li> <li>• Systèmes nouveaux (l'informatisation),</li> <li>• Nouveau capital humain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La situation d'insécurité sur une période</li> <li>• Les perturbations</li> </ul>

Tableau 2.1 Notion de Flexibilité [16]

### 2.2.2 Réactivité :

La notion de réactivité est fréquemment assimilée à celle de la flexibilité, Une entreprise réactive est celles qui réagissent au plus vite aux exigences de leur clientèle en réalisant des actions de complémentarité ou en augmentant la flexibilité des moyens.

Si la flexibilité est la capacité d'un système de fabrication à accepter divers ordres de fabrication, alors la réactivité est la capacité d'absorber les chocs (tous les évènements imprévus à l'exception des ordres de fabrication) sans sacrifier la productivité.

La réactivité est une propriété inhérente au système, donc un système entièrement réactif est également complètement transparent. [14]

### 2.2.3 Robustesse :

La robustesse (stabilité) est similaire à la réactivité, qui est une caractéristique inhérente au système de production. Il y a aussi un lien fort entre les deux. En effet, les phénomènes anormaux dans le processus de production peuvent être des raisons internes (casse, bris d'outil, etc.), ou des raisons externes (interruption de livraison, erreurs d'étiquette, etc.) ...

Si les raisons externes ne peuvent pas être éliminées directement (interruption interne politique de l'atelier), vous pouvez éviter d'utiliser des matériaux plus durables au lieu du réservoir intérieur.

Par conséquent, la fiabilité est la capacité d'un système de production à convertir des matières premières en produits finis ou semi-finis sans provoquer d'évènements destructeurs, c'est-à-dire sans endommager ses composants. [14]

## 2.3 Les principaux composants du FMS :

Dans un FMS les composants basics sont :

### 1. Postes de travail :

Aujourd'hui, ces postes de travail sont principalement des machines-outils à commande numérique par ordinateur (CNC) qui réalisent un usinage sur des groupes de pièces.

Les FMS sont développés avec d'autres types d'équipements de traitement, tels que des postes d'inspection, des ateliers d'assemblage et des presses à tôle (Postes de chargement et de déchargement, Postes de matriçage, etc.).

### 2. Système automatisé de transport et de mise en stock des produits :

Divers systèmes de traitement automatisés sont utilisés pour déplacer des pièces et des composants entre les stations de traitement, combinant parfois des entrepôts en fonctions. Les différentes fonctions du système automatisé de stockage et de traitement sont énumérées ci-dessous.

- a) Manutention de diverses formes de pièces de fabrication.
- b) Mouvement de pièces de travail aléatoire et autonome entre les stations de travail.
- c) Accessibilité facile permettant le chargement et le déchargement des pièces.

d) Possibilité de pilotage informatique.

### 3. Système de pilotage assisté par ordinateur :

Il sert à assurer la cohérence des opérations effectuées par les postes de traitement et du système de manutention du FMS, Les diverses fonctionnalités de ce système informatique de contrôle comprennent :

- a) Surveillance de tous les postes de travail.
- b) Suivi de la production.
- c) Diffusion des consignes de pilotage aux stations de travail.
- d) Système de manipulation des tâches et suivi des opérations.

## 2.4 Différents types de FMS :

Dans le monde industriel il existe différents types de FMS :

- FMS séquentiel :

Ce système permet de réaliser un lot de pièces d'un type donné, puis la planification et la préparation du lot suivant sont effectuées. Le système fonctionne comme une chaîne de transmission flexible par petits lots.

- FMS spécialisé(e) :

Ce système permet de fabriquer la même combinaison mais limitée de types de lots de pièces de manière cohérente sur une longue période de temps.

- FMS aléatoire :

Ce système permet de produire un ensemble aléatoire de types de pièces à chaque instant.

- FMS d'ingénierie :

Il fabrique le même ensemble de parties durant toute sa durée du cycle de vie.

- FMS modulaire :

Le FMS modulaire avec un hôte FMS complexe permet aux utilisateurs de FMS d'étendre progressivement leurs fonctions à l'un des quatre FMS ci-dessus.

## 2.5 Types de disposition du FMS :

- a) Type de ligne :

Dans ce type de système, la machine et le système de traitement sont sur la même ligne, ce qui est plus adapté aux systèmes où les pièces sont déplacées d'un poste de travail à un autre dans une séquence définie avec précision sans refoulement. Le système est très similaire au type de transmission, et le travail est toujours à sens unique, comme le montre la figure 2-1.

Dans ce système chaque poste de travail dispose d'un système de traitement secondaire qui sépare la plupart des pièces de la ligne de production primaire. Traitement utilisé : système de transport linéaire, système de transport ou véhicule ferroviaire. Ou le système de transport ferroviaire.

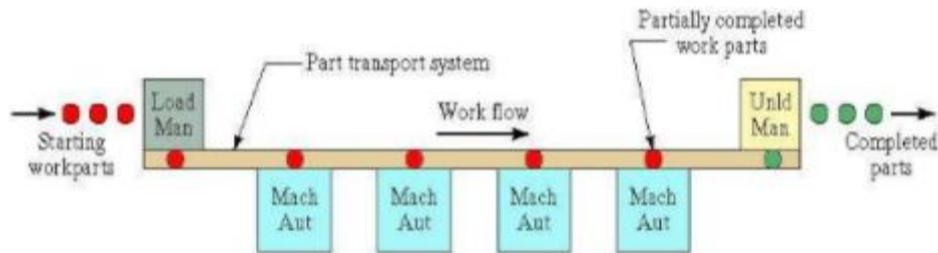


Figure 2-1 Disposition du système flexible en ligne.

b) Type de boucle (loop) :

Les postes de travail sont organisés en cycle et sont desservis par le système de traitement des pièces du cycle.

Dans la figure 2-2, les pièces circulent généralement dans un sens du cycle, et peuvent s'arrêter et être transférées vers chaque poste de travail. Chaque station dispose d'un équipement de traitement secondaire, qui est utilisé pour transférer les pièces vers et depuis la station. Et de la tête de travail du poste de travail au circuit de traitement. Le poste de chargement et de déchargement est généralement situé à une extrémité de la boucle, et cette disposition du chantier permet aux palettes de revenir à leur position d'origine en ligne droite.

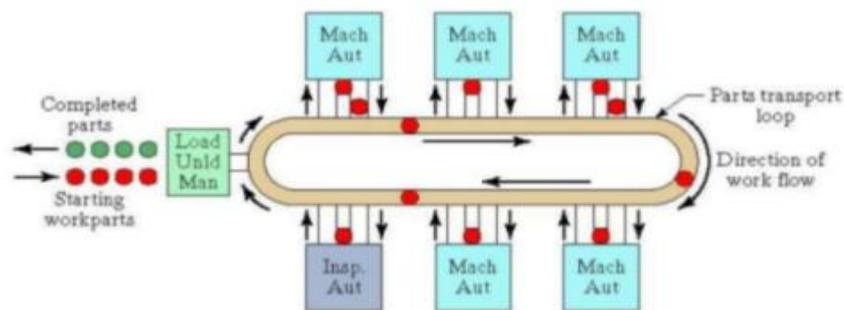


Figure 2-2 Disposition en Loop.

c) Type de disposition rectangulaire :

La disposition rectangulaire permet de recycler les palettes vers la première station dans l'ordre après déchargement à la station finale.

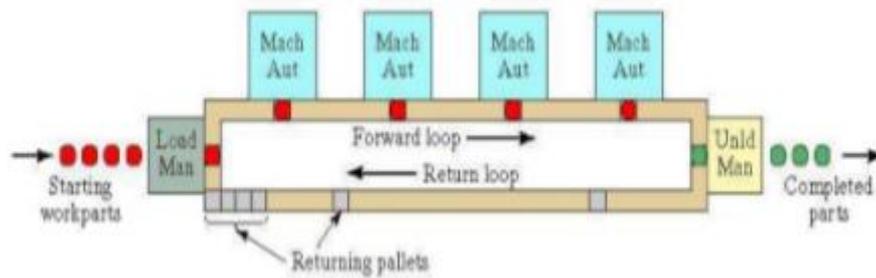


Figure 2-3 Disposition rectangulaire du FMS.

d) Type d'échelle (Ladder) :

Il s'agit d'un seuil, qui contient les étapes dans lesquelles le travail est effectué. Les étapes augmentent le nombre d'options pour passer d'un ordinateur à un autre. Passer d'une machine à l'autre. C'est un lien vers la couche où se trouve le poste de travail, sans avoir besoin d'un système de traitement secondaire. Cela raccourcit la distance moyenne de déplacement et minimise le système de manutention de matériaux en vrac, raccourcissant ainsi le temps de transit entre les stations.

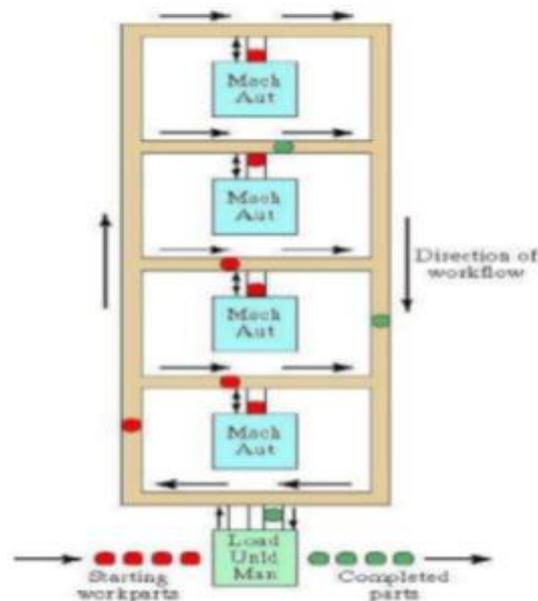


Figure 2-4 Disposition de l'échelle du FMS.

e) Type de champ libre :

La configuration en champ libre est illustrée sur la figure 2-5. La station de chargement et de déchargement est généralement en un seul endroit. Les pièces passent par

toutes les sous-stations, telles que les machines-outils CNC, les machines à mesurer tridimensionnelles et les stations de nettoyage, d'une sous-station à l'autre. Utilisez l'AGV.

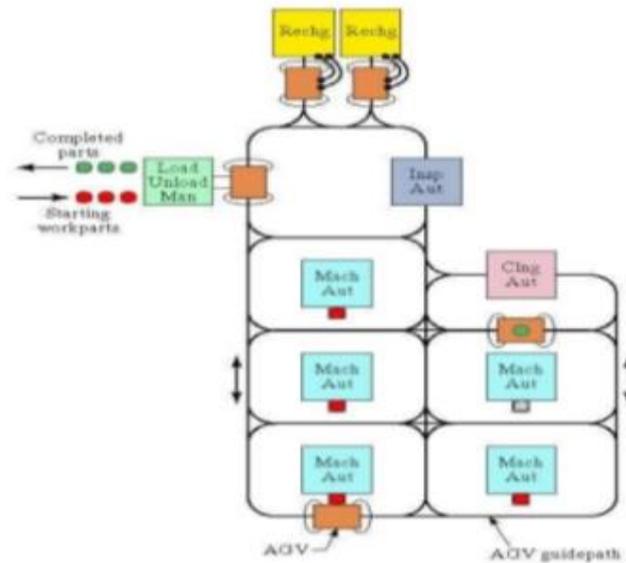


Figure 2-5 Disposition en champ libre du FMS.

f) Type centré de robot :

La cellule robotisée centrée représente une forme relativement nouvelle de système flexible dans laquelle un ou plusieurs robots sont utilisés comme système de traitement, comme le montre la figure. Les robots industriels peuvent être équipés de montages, ils sont donc très adaptés à la manutention de matériaux.

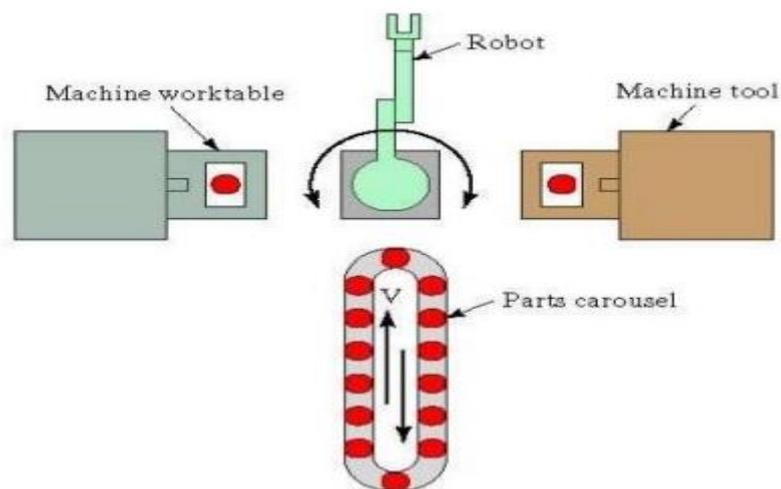


Figure 2-6 Disposition centrée du FMS.

## 2.6 Objectifs d'un FMS :

Les buts essentiels à atteindre lors de l'installation d'un FMS :

- Meilleure destination de l'attelage de production ; paix des stocks (ex : tâches en cours, capital ; délais d'accomplissement principalement courts).
- Accroître le rendement technique :
  - Une augmentation des taux de production.
  - Temps de remplacement ou de redémarrage plus courts ou inexistants.
  - Logistique d'usine Petits lots.
  - Intégration des systèmes de production dans le système.
  - Gamme de produits plus large.
  - Production simultanée du portefeuille de produits.
- Promouvoir la sécurité future des entreprises : améliorer la compétitivité, améliorer la qualité et renforcer l'image de l'entreprise.
- Améliorer le développement des commandes :
  - Détermination de la capacité de production.
  - Raccourcir le délai de livraison/délai de livraison.
- Une réduction des dépenses relatives aux pièces.
- Une réduction des coûts.

Les nécessaires conformes du FMS sont les suivants :

1. Améliorez les accords à long terme grâce à un apprentissage plus rapide et plus facile :
  - ❖ Développement des quantités de produits.
  - ❖ Ajout et introduction de nouveaux produits.
  - ❖ Mélange de composants différenciés.
  - ❖ Augmentez le taux d'utilisation des machines.
2. Amélioration de la réponse à court terme grâce aux :
  - ❖ Changements technologiques Changements de processus.
  - ❖ Temps d'arrêt ou fraisés indisponibles.
  - ❖ Défaillances de fraisage Retard de livraison du matériau.
3. Diminuez les coûts de main-d'œuvre directs :
  - ❖ Éloigner les opérateurs du site de transformation (leurs responsabilités peuvent être étendues).
  - ❖ Éliminer la dépendance vis-à-vis des machines-outils hautement qualifiées (leurs compétences de fabrication sont les plus adaptées aux fonctions d'ingénierie de production).
  - ❖ Fournir des catalyseurs pour la mise en œuvre et l'accompagnement des délaissés ou mal maîtrisés usines de transformation.
4. Améliorez le contrôle opérationnel des manières suivantes :
  - ❖ Réduisez le nombre de variables non contrôlées.
  - ❖ Fournir des outils pour identifier et réagir rapidement aux écarts par rapport au plan de production.
  - ❖ Réduire la dépendance à la communication humaine.

### 2.6.1 Implémentation d'un FMS :

La mise en œuvre de FMS doit garantir que tous les composants installés fonctionnent comme un système ; vous devez optimiser et ajuster chaque composant FMS, y compris le matériel et les logiciels, pour obtenir les meilleures performances.

La mise en œuvre du FMS est une étape de transition, réduisant la dépendance vis-à-vis des fournisseurs et du personnel des fournisseurs, et s'appuyant davantage sur le personnel et l'expérience internes.

En outre, l'acheteur et le fournisseur du système surveillent, enregistrent et vérifient d'autres aspects de l'acceptation du système pour vérifier la conformité aux spécifications. Les points à surveiller et à vérifier pendant le test d'acceptation comprennent la précision des performances et du niveau de performance des pièces, l'utilisation de la fonction et de l'équipement, la disponibilité des outils et des fixations, et l'arrêt de l'équipement de processus d'approvisionnement, la maintenance et le fonctionnement du service, la fiabilité et la sécurité du traitement, la qualité, la précision et la disponibilité Capacité du système et la fiabilité du flux de travail des pièces répétitives entrant et sortant du système d'égout, Démarrer et vérifier le fonctionnement du logiciel.

### 2.6.2 Avantages et inconvénients d'implémentation du système flexible :

- Avantages :
  - ❖ Réduisez les coûts de main-d'œuvre directs en réduisant le nombre d'employés.
  - ❖ Échangez rapidement et à moindre coût une pièce contre une autre, améliorant ainsi l'utilisation du capital.
  - ❖ Réduisez les stocks grâce à une planification et une programmation précise.
  - ❖ Grâce au contrôle automatisé, la qualité est constante et meilleure.
  - ❖ Réduisez les coûts unitaires en augmentant la productivité avec le même nombre d'employés.
  - ❖ Économisez indirectement du travail en réduisant les erreurs, les reprises, les réparations et les rebuts.
- Inconvénients :
  - ❖ Systèmes de fabrication complexes.
  - ❖ Problèmes techniques liés au placement précis des composants et au temps de traitement précis des composants.
  - ❖ C'est cher et ça vaut des millions de dollars.
  - ❖ Importante planification préalable.
  - ❖ L'adaptabilité aux changements de produits ou de gammes de produits est limitée.

## 2.7 Technologie CIM

### 2.7.1 Définition :

Le CIM est défini par différents utilisateurs et peut être mis en œuvre à mesure que la complexité augmente. Pour de nombreuses entreprises, l'amélioration de la communication au sein de l'entreprise est un cœur de métier. D'autres le prolongent. Intégration, y compris la

relation entre les fonctions de conception et de fabrication. De la circulation de l'information à tous les aspects de l'entreprise.

### 2.7.2 Les éléments d'un système CIM :

L'organisation d'une entreprise manufacturière doit satisfaire aux cinq fonctions ci-dessus. La figure 2-7 montre le cycle des activités de traitement de l'information qui se produit généralement dans les entreprises de fabrication qui fabriquent des pièces discrètes et les assemblent en produits finis à utiliser. Les étapes d'installation décrites dans la section précédente sont indiquées au centre de la figure. Le cycle de traitement de l'information représenté par l'anneau extérieur peut être décrit comme composé de quatre fonctions :

- a) Planification de la production.
- b) Gestion de la production.
- c) Fonctions de l'entreprise.
- d) Conception du produit.

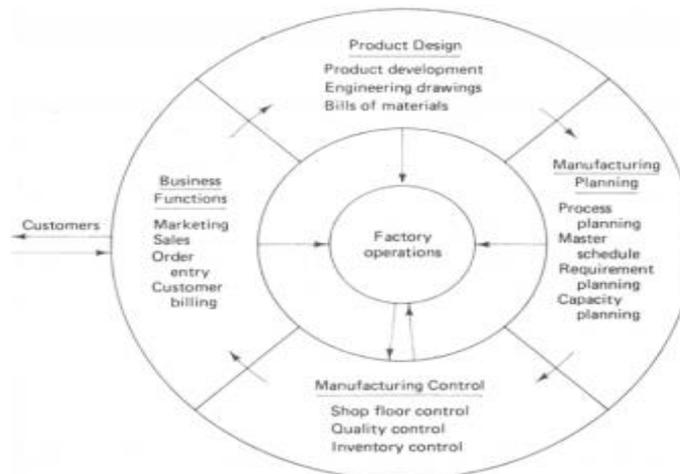


Figure 2-7 Le cercle du CIM de base pour une entreprise de production classique.

### 2.7.3 Les avantages et limitations du CIM :

La CIM est un élément important de la rentabilité du système de fabrication. Les bénéfices de la CIM sont décrits ci-après :

- Augmentation de la productivité de la fabrication.
- Amélioration de la flexibilité et la réactivité.
- Amélioration du service client.
- Réduction du coût total.
- Délai de livraison plus court.
- Amélioration de la performance de l'ordonnancement.
- Réduction du niveau des stocks.
- Réduction du temps de lancement d'un nouveau produit sur le marché.
- Amélioration de la qualité des produits.

Et les limites du CIM sont les suivantes :

- Coût élevé de la maintenance.
- Coût élevé de la maintenance.
- Taux de chômage.
- Main d'œuvre compétente nécessaire.
- Un coût de départ important.

## **2.8 Technologie du groupe et système cellulaire :**

### **2.8.1 Définition :**

La technologie de cluster est un groupe de composants avec des attributs similaires afin d'utiliser leur similitude dans l'étape de conception ou de production du cycle de production ; leur similitude dans le processus de conception ou de fabrication est obtenue grâce à l'utilisation de systèmes de classification et de codage structurés et de logiciels de support.

Réalisé pour tirer parti de la similitude des composants dans les caractéristiques de conception et la séquence de traitement.

Le but de cette identification est de regrouper les membres en familles en fonction de leurs caractéristiques communes. Une fois les éléments répartis en différentes séries, le but de cette technique est double : favoriser la conception et la standardisation en réutilisant des dessins d'éléments similaires, et favoriser la fabrication. Produire des pièces de la même série en même temps ou dans la même unité de production. L'utilisation de la technologie de traitement par lots nécessite un effort considérable pour identifier et classer chaque pièce pour former une série différente.

Il existe trois méthodes d'identification et de classification des pièces en fonction de la technologie du groupe : l'inspection visuelle, l'analyse des processus de fabrication et l'analyse des données de conception et de fabrication.

### **2.8.2 Raisons d'utiliser la technologie de groupe : [34]**

La concurrence internationale de plus en plus féroce et la demande en constante évolution du marché font que diverses industries sont confrontées à une pression énorme pour rationaliser la production ; l'industrie est confrontée à une pression pour rationaliser la production. TG peut étudier avec succès les problèmes de marketing.

Les concepts de gestion modernes tels que les processus commerciaux et la réingénierie mettent l'accent sur la nécessité de briser les barrières entre les secteurs industriels. La fabrication de TG optimise les flux de matières et ne réduit pas les activités à valeur ajoutée.

TG suppose que de nombreuses pièces ont des caractéristiques géométriques similaires. En combinant ces exigences de conception, une solution générale peut être trouvée.

Il existe trois méthodes pour regrouper les pièces en séries de pièces :

- L'inspection visuelle.
- La classification des pièces et le codage.

- Analyse du processus de fabrication.

### 1. Inspection visuelle :

Cette méthode est la plus simple et la moins coûteuse, et consiste à classer les pièces en séries de pièces en examinant les pièces physiques ou leurs groupes de photos et en les organisant en images graphiques ayant des propriétés similaires.

### 2. Classification des pièces et le codage :

Ou des pièces qui doivent être regroupées selon les caractéristiques et les caractéristiques du processus de conception et de fabrication, elles doivent être classées dans des catégories prédéfinies et codées pour être trouvées et utilisées. La classification et le codage sont des outils informatiques utilisés pour saisir des données. Ils vous permettent d'extraire et d'analyser des données en fonction des fonctionnalités requises, qui sont essentiellement un système de fichiers similaire au code postal ou au système de classification utilisé dans les bibliothèques.

### 3. Analyse du processus de fabrication :

L'analyse du flux de travail est une technologie qui permet d'identifier des séries de pièces et des machines de groupe sur la base de l'analyse du flux de travail de divers produits manufacturés. Analyse du workflow de divers produits fabriqués en usine. Par terre, Les pièces qui ne sont pas nécessairement de forme similaire mais nécessitent une séquence d'opérations similaire sont regroupées en une série.

Ils s'unissent en une famille. La série résultante est ensuite utilisée pour concevoir ou construire des unités de machines.

PFA utilise un algorithme de regroupement pour créer des cellules.

Après avoir collecté les données nécessaires, à savoir le numéro de pièce et la gamme de machines de chaque produit, l'ordinateur est utilisé pour classer les produits. Groupements de produits, chaque regroupement contient des éléments qui nécessitent le même chemin.

La même zone de traitement est appelée un lot. Chaque colis se voit attribuer un numéro d'identification et les colis de même qualité sont regroupés.

La classification de zone suivante est utilisée pour déterminer quelles machines constituent une unité de machine raisonnable.

#### 2.8.3 Système cellulaire :

##### 2.8.3.1 Définition :

La définition d'unité de production signifie généralement l'agencement logique d'équipements à commande automatique, manuelle ou numérique en groupes ou groupes de machines, de manière à traiter les pièces selon la série de pièces et à passer au traitement séquentiel suivant. Les pièces de l'unité sont transportées vers la prochaine station de traitement, de test ou d'assemblage séquentiel. Aujourd'hui, le terme "unité d'assemblage" a un sens beaucoup plus large, faisant référence au chargement automatique, au déchargement et au chargement de pièces dans une certaine mesure, au déchargement, au retardement ou au remplacement automatique de pièces sur un groupe de machines.

### 2.8.3.2 Classification des cellules :

Les cellules de fabrication flexibles peuvent être divisées en quatre catégories : [34]

Machines-outils CNC traditionnelles, Unités de machines-outils CNC indépendantes ou micro-unités, Unités multi-machines FMS intégrées.

#### 1. Machines-outils CNC traditionnelles :

Les machines CNC autonomes ont un espace de stockage limité, sont équipées de changeurs d'outils automatiques et, traditionnellement, chaque machine à un opérateur. Et traditionnellement, ils sont utilisés par les opérateurs.

Les machines CNC indépendantes sont combinées dans une cellule d'assemblage standard pour une série de pièces, mais fonctionnent toujours séparément entre la machine et l'opérateur. Les voitures dans de telles cellules sont parfois peintes d'une couleur similaire, ce qui renforce l'emplacement des cellules d'un groupe particulier de pièces et les rend différentes des autres cellules.

Certaines machines CNC indépendantes ont des caractéristiques et fonctionnent comme une unité. Lors de la modification de la configuration de l'unité.

Une unité de machine provoquée par des changements dans la relation entre la machine et l'opérateur.

Le système est généralement un système de secours et fonctionne à un ratio Machine/Opérateur de deux à un ou dans certains cas de trois à un.

#### 2. Cellule ou mini-cellule pour machine à CN unique :

L'unité d'une simple machine CNC comprend un changeur de pièces automatique avec un plateau de travail fixe ou une bande transporteuse, un bras robotique installé à l'avant de la machine et un grand magasin d'outils.

De nombreuses machines entrent dans cette catégorie avec de multiples options telles que la détection automatique, la détection d'outil casse et la surveillance du liquide de refroidissement haute pression. En termes de popularité, de fonctionnalités et de prix, car il peut être acheté au prix d'un FMS complet, et il peut être programmé et chargé de pièces pour fonctionner sans surveillance pendant des heures.

#### 3. Cellule multi-machine intégrée :

Une unité multi-machines intégrée est constituée d'un grand nombre de machines-outils, dont la plupart sont du même type. Ces machines comportent des Pièces situées à l'entrée de l'unité ou devant chaque machine. A l'aide de robots manipulateurs, les pièces sont empilées sur des palettes dans un système en ligne composé de deux ou trois machines et déplacées progressivement.

Les unités de plusieurs machines sont actionnées par des robots d'exploitation, ou les pièces sont empilées sur des palettes dans un système de ligne de production à deux ou trois machines. Trois machines sont utilisées pour le déplacement progressif d'une station machine à une autre application typiques Une application typique d'une cellule robotisée multicellulaire est la production en série d'une série de petites pièces stables.

#### 4. Système flexible de production :

Parfois appelée cellule de production flexible, elle se caractérise par plusieurs machines qui déplacent automatiquement les pièces de la palette vers et hors d'une station de traitement, puis se déplacent de la vers un autre poste de travail, et est contrôlée par un ordinateur central.

##### 2.8.3.3 Conception des cellules :

Le but de ce travail est de regrouper les ressources en cellules afin que la plupart (sinon la totalité) du temps de production soit passé dans des boîtes pendant le processus de production. Étant donné que le nombre de voitures dans chaque unité est limité, il y parvient en minimisant le flux entre les unités.

Ce problème de conception de cellules de production, qui est largement discuté dans la littérature, est un problème complexe, et plusieurs méthodes précises et heuristiques ont été proposées pour le résoudre. ... Certains d'entre eux sont basés sur des méthodes de classification.

Les solutions de planification de la production unitaire peuvent être réparties sur les trois niveaux suivants :

Niveau Stratégique	Niveau tactique	Niveau d'exploitation
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La formation de la série de produits.</li> <li>• La détermination des conditions de fonctionnement de la machine.</li> <li>• La formation des cellules</li> <li>• La détermination du nombre de cellules</li> <li>• La fabrication de la structure cellulaire</li> <li>• La formation des produits à base de la matrice cellulaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attribuez des séries et ou des produits aux cellules</li> <li>• Organisez les séries et les produits dans chaque cellule.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programmez la cellule après avoir déterminé l'heure de début et effectuez chaque opération.</li> <li>• Détermination du temps de cycle.</li> <li>• Détermination du nombre de stations.</li> <li>• Calcul des salaires.</li> </ul>

Tableau 2-2 Les tâches liées à chaque Niveau.

##### 2.8.4 Avantages de la TG :

- Réduire l'achat et la consommation de différents matériaux.
- Faciliter la construction et la standardisation en réutilisant les mêmes pièces dans différents produits.

- Minimiser le temps de débogage d'une même série.
- Simplifiez le contrôle qualité.
- Maximiser Améliorer la production.
- Les machines appartenant à une série peuvent être combinées dans une cellule de travail.

### 2.9 Avantages d'un système flexible :

La combinaison de la technologie et des méthodes de fabrication intégrées dans FMS offre de nombreux avantages. L'événement principal qui conduit généralement l'entreprise interrogée à investir dans le FMS est l'introduction de nouveaux produits ou de nouvelles lignes de produits qui nécessitent de nouvelles capacités de production.

- Utilisation élevée de l'équipement.
- Réduire l'espace au sol.
- Réduction des coûts d'équipement.
- Réduction des coûts de main-d'œuvre directe.
- Délai de livraison plus court, travaux en cours réduits et meilleure réponse du marché.
- Dégradation graduelle du système.
- Simplifier la production et améliorer le contrôle de gestion.
- Haute qualité de produit.
- Introduction progressive.
- Performance financière.
- Fabrication juste-à-temps.

### 2.10 Difficultés d'un système flexible :

Bien qu'il y ait de nombreux avantages à utiliser FMS, il est nécessaire de considérer certaines des difficultés actuellement envisagées.

- Leur mise en œuvre dans le processus de production peut être compliquée.
- Nécessitent des employés hautement qualifiés pour faire fonctionner les machines.
- L'achat ou l'adaptation des machines sera couteux.

### 2.11 Job shop flexible :

Un atelier job shop est un atelier qui produit un grand nombre de pièces uniques différentes, et nécessite différentes séquences d'actions entre les équipes de production. La planification et les tâches quotidiennes sont les caractéristiques de base de l'atelier. L'automatisation est aux mieux limitée à un seul composant dans l'atelier, mais des tentatives ont été faites pour parvenir à une automatisation complète.

Le problème de l'ordonnancement consiste à affecter les opérations aux machines et à ordonner le départ des opérations tout en minimisant une série de fonctions objectives, telles que le temps de traitement maximal de toutes les opérations ou le temps d'usinage total(makespan). Le problème d'ordonnancement flexible (FJSP) est une évolution du

problème d'ordonnancement classique, où toute opération peut être exécutée sur plusieurs machines, et où toute machine peut exécuter plusieurs opérations. [35]

Le problème FJSP est une combinaison de décisions d'affectation des machines et d'ordonnancement des opérations, de sorte qu'une résolution peut être formulée par l'affectation des opérations sur les machines et la séquence de traitement des opérations sur les machines. Composé de deux parties :

- a. Vecteur d'affectation de la machine.
- b. Vecteur de séquençage des opérations. [36]

Le FJSP est présenté comme une version généralisée du traditionnel Job-Shop Scheduling Problem (JSP) et des milieux de machines en mode parallèle... On dispose d'un ensemble de postes de travail avec à chaque fois de nombreuses machines similaires en parallèle. Chaque tâche nécessite un traitement à chaque poste de travail dans l'une des machines et a sa propre route à travers les postes de travail.

Dans le cas où tous les jobs possèdent le même itinéraire, il est classifié comme un problème d'atelier à flux flexible (FFSP) [37].

Dans le problème d'ordonnancement de type Job shop flexible « (généralement désigné par  $J||C_{max}$ ) il existe deux divergences principales.

1. Une opération peut uniquement être exécutée sur une machine précise.
2. Il existe aucune contrainte de limitation de palettes dans  $J||C_{max}$  , ce qui permet de traiter tous les jobs simultanément. [38]

Par conséquent, dans un job shop flexible  $N = P$  et  $|M_{ij}| = 1$ , le concept de flexibilité dans le système de fabrication flexible couvre de nombreux points différents. Dans ce sens, la flexibilité représente la disponibilité de machines différentes pour certaines ou toutes les opérations d'un job. [38]

Selon [39], la capacité de traiter une même pièce de diverses façons. C'est la flexibilité du routage.

D'après [40] la flexibilité dans un problème job shop flexible est classée en deux parties :

Job shop flexible total : toute opération peut être exécutée sur n'importe quelles machines.

Job shop flexible partiel : ou quelques tâches ne sont exécutables uniquement dans une partie des machines disponibles.

### 2.11.1 Formulation classique de problème :

Le FJSP se présente de la manière suivante :

- $n$  : nombre totale de jobs

- $m$  : nombre totale de machines
- $n_i$  : nombre total d'opérations de job  $i$
- $O_{ij}$  : la  $j^{\text{ème}}$  opération du job  $i$
- $M_{ij}$  : l'ensemble de machines disponibles pour l'opération  $O_{ij}$
- $p_{ijk}$  : temps de traitement de  $O_{ij}$  sur la machine  $k$
- $t_{ijk}$  : temps de début de l'opération  $O_{ij}$  sur la machine  $k$
- $C_{ij}$  : temps de fin de l'opération  $O_{ij}$
- $i$  : indice des jobs  $i = 1, 2, \dots, n$
- $j$  : indice de la séquence d'opérations  $j = 1, 2, \dots, n_i$
- $k$  : indice de machine  $k = 1, 2, \dots, m$

Il y a certaines hypothèses et contraintes pour le FJSP, qui peuvent être citées comme suivant [18] :

- Toutes les machines sont disponibles à l'instant zéro
- Tous les jobs sont disponibles après les dates de libération.
- Chaque opération ne peut être exécutée que sur une machine à la fois.
- Chaque machine ne peut lancer qu'une seule opération à la fois.
- Chaque opération ne peut être interrompue pendant le processus de traitement
- Il n'y a pas de contraintes de précédence entre les opérations de différents jobs, car les jobs sont indépendants les uns des autres.
- Pour chaque job, la séquence des opérations est prédéterminée.

### 2.11.2 Complexité :

Le problème de l'ordonnancement de type job shop est l'un des problèmes les plus significatifs et les plus difficiles, qui est connu comme étant un problème d'optimisation combinatoire NP-hard depuis 1950. [19]

Selon [41], Dans un problème d'ordonnancement de type job shop flexible, il existe un certain nombre de machines à usage multiple ( $m$ ) dans l'atelier. Pour chacune de ces machines-outils multifonctionnelles, il peut y avoir autant de planifications réalisables que la factorielle du nombre de jobs ( $n!$ ). Cela correspond à la difficulté de l'ordonnancement sur une seule machine. Comme il y a plus d'une machine dans l'atelier, les jobs doivent être considérés pour le séquençage sur d'autres machines flexibles aussi. Ce problème génère une complexité importante pour F-JSSP et rend sa complexité élevée à  $(n!)^m$ .

Le JSSP classique s'est avéré être fortement NP-hard par Garey, Johnson, et Sethi en 1976. En conséquence, le F-JSSP est un problème NP-hard.

---

## 2.12 Conclusion :

Ce chapitre a présenté les définitions de base concernant les systèmes flexible de fabrication.

Nous avons commencé par un aperçu des systèmes de fabrication flexibles. Ce chapitre est consacré à l'introduction des concepts nécessaires aux systèmes de fabrication flexibles, tels que la flexibilité, la réactivité, la fiabilité, etc.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée pour la technologie CIM et la technologie de groupe et systèmes cellulaires, décrit les avantages de l'introduction de cette méthode dans les systèmes de fabrication flexibles, et donner plusieurs méthodes pour classer les technologies de groupe.

La section finale de ce chapitre a porté sur le système job shop flexible, sa formulation ainsi que la modélisation de ce problème.

Le chapitre suivant est dédié à la présentation du modèle proposé d'un problème job shop flexible avec une flexibilité totale et une contrainte d'indisponibilité des machines, et à notre solution pour atteindre notre objectif qui est la réduction du makespan et c'est un algorithme proposé par nous.

---

# **Chapitre III :**

## **Présentation et formulation du problème**

---

### 3.1 Introduction :

Dans un problème d'ordonnancement de type Job shop Flexible, les opérations des jobs vont effectuer sur des machines de traitements alternatifs, les données de la machine à mouvement alternative dépendent de la machine et du mode de fonctionnement. Par conséquent, le FJSP dispose d'informations supplémentaires sur l'allocation des machines, les recherches sur le JSP dans la littérature divisent généralement cette relation en deux sous-problèmes. Le premier sous problème est d'affecter des opérations à une machine parmi plusieurs machines disponibles (assignement), et le deuxième sous-problème est le séquençage de toutes les opérations sur chaque machine.

La majeure partie de la bibliographie traitant des problèmes d'ordonnancement se positionnent dans le contexte dans lequel les ressources destinées à la réalisation des tâches sont accessibles de façon continue.

Pourtant, cette supposition ne correspond à aucune réalité des entreprises. En particulier, les diverses ressources, que ce soit humaines ou matérielles, pourront, pour des raisons diverses, être indisponibles,

Cette indisponibilité peut être due à une opération de maintenance sur les machines de l'atelier ou aux plannings du personnel. Nous proposons ici qu'une indisponibilité est due dans le système.

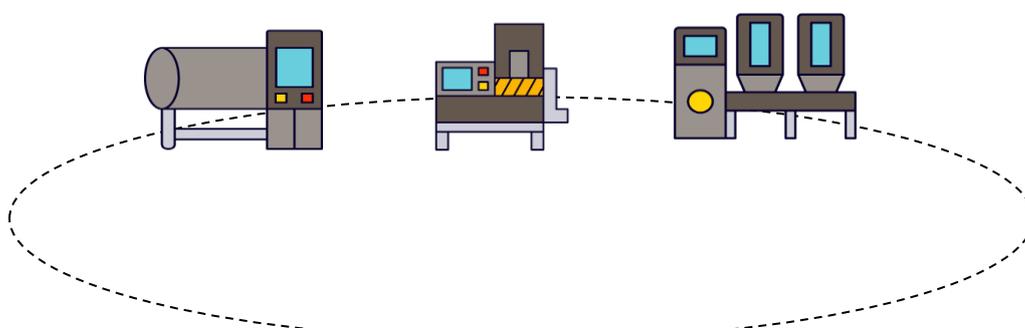
Dans cette partie de projet, nous allons présenter le modèle sur lequel nous faisons nos études.

### 3.2 Présentation du système FJSP étudié :

Dans cette partie du travail nous avons étudié et simulé un système flexible de production du type job shop avec une flexibilité totale afin d'appliquer l'algorithme proposé.

Nous avons proposé d'utiliser le système présenté sur la figure (figure 3-1), ce système se compose de 6 stations de travail, une station d'entrée (SE) et autre station de sortie (SS), chaque station de travail contient une machine avec une capacité d'une pièce. Chaque tâche doit être traitée sur chaque poste de travail sur l'une ces machines et a son propre chemin à travers le poste de travail.

L'arrangement de notre système de fabrication est illustré dans la figure ci-dessous



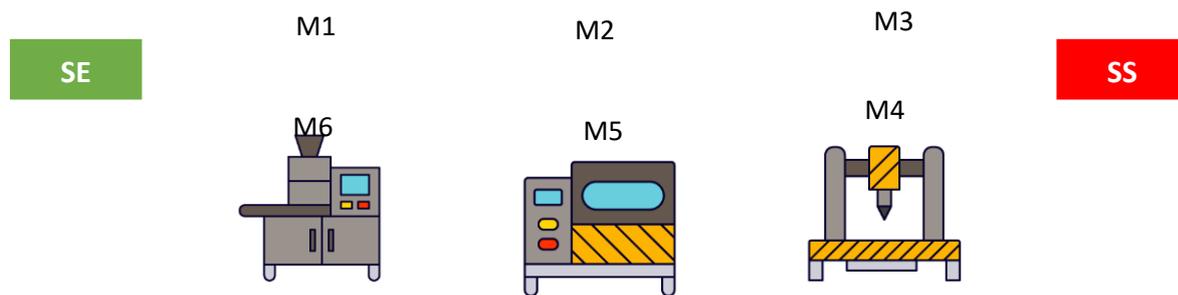


Figure 3-1 Organisation du système étudié.

Le tableau 2.2 détermine le système FJS proposé par nous avec une flexibilité totale.

Jobs	Opérations	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Job 1	O11	12	10	8	9	6	15
	O12	25	20	13	8	9	10
	O13	14	18	11	14	25	24
	O14	15	13	26	16	20	22
Job 2	O21	17	15	28	30	19	25
	O22	10	24	23	15	15	12
	O23	11	14	9	10	14	7
Job 3	O31	17	23	19	20	22	19
	O32	20	15	28	24	18	12
	O33	21	14	10	19	20	23
	O34	20	24	18	15	21	28
	O35	25	22	28	21	20	32
Job 4	O41	15	17	12	17	18	16
	O42	23	21	25	30	25	35
	O43	19	31	20	17	22	25
Job 5	O51	12	15	17	15	10	23
	O52	21	25	19	15	23	18
	O53	18	28	30	25	19	16
	O54	14	22	18	17	20	17
	O55	16	11	9	15	14	12
	O56	37	18	36	26	26	23
Job 6	O61	21	24	15	17	14	12
	O62	13	18	20	25	21	29
	O63	27	25	30	21	20	23
	O64	10	15	12	8	10	13

Tableau 3-1 Les temps de traitements de chaque tâche par machines.

### 3.3 Modélisation du système proposé :

#### 1. Etape d'assignement :

Pour affecter les opérations aux différentes machines, nous avons proposé d'utiliser l'heuristique SPT.

La règle de gestion des temps opératoires (SPT) trie les différentes tâches par ordre croissant de temps opératoire. Chaque fois que la machine est au repos, le travail le plus court sera préparé pour commencer. Cette règle est le plus approprié pour déterminer le temps d'achèvement total et le temps d'achèvement minimum pondéré.

Le tableau suivant montre les temps de traitement utilisés selon la règle SPT :

Jobs	Opérations	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Job 1	O11					6	
	O12				8		
	O13			11			
	O14		13				
Job 2	O21		15				
	O22	10					
	O23						7
Job 3	O31	17					
	O32						12
	O33			10			
	O34				15		
	O35					20	
Job 4	O41			12			
	O42		21				
	O43				17		
Job 5	O51					10	
	O52				15		
	O53						16
	O54	14					
	O55			9			
	O56		18				
Job 6	O61						12
	O62	13					
	O63					20	
	O64		8				

Tableau 3-2 Table d'affectation.

## 2. Étape de séquençage :

La séquence peut être définie comme la sélection de la séquence d'exécution d'une série de travaux sur différentes machines. L'objectif du séquençage des problèmes est de terminer le travail le plus rapidement possible et de minimiser les temps d'arrêt.

Le séquençage est le processus de planification des tâches sur la machine pour minimiser le temps, les coûts et la consommation globale des ressources, maximisant ainsi les profits. Ensuite, lorsque le poste de travail est ouvert pour la tâche, il a la priorité la plus élevée.

Une fois la procédure d'affectation réalisée, le problème de job-shop totalement flexible devient un simple problème de job-shop classique. Il est possible d'associer à chaque JSP.

Utilisons le logiciel d'assistance à l'ordonnancement **LEKIN**, LEKIN® est un système de planification développé à la Stern School of Business de l'Université de New York. La plupart du système a été développé et écrit par des étudiants de l'Université de Columbia. LEKIN® a été créé comme un outil pédagogique dont le but principal est d'initier les étudiants à la théorie de la programmation et à ses applications. De plus, l'évolutivité du système permet (et encourage) son utilisation pour le développement d'algorithmes. Le projet est dirigé par le professeur **Michael L. Pinedo**, le professeur **Xuli Chao** et le professeur **Joseph Lyng**. Ce développement a été soutenu en partie par la National Science Foundation. Et la fonction objective est  $C_{max}$ . Sans prendre en considération le temps de manutention entre machines

### 3.3.1 Comparaison des résultats trouvés par LEKIN :

Dans cette partie de travail nous avons présenté les divers résultats qui sont trouvés utilisons le logiciel LEKIN.

➤ L'ordonnement trouvé selon la règle **SPT**.

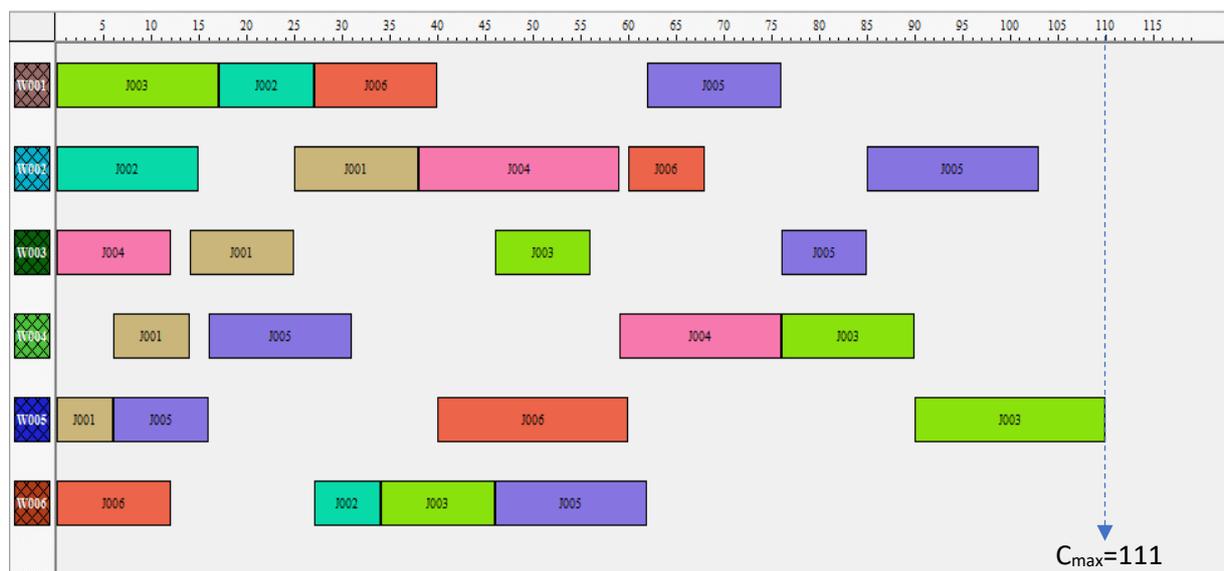


Figure 3-2 Diagramme de Gantt trouvé utilisant la règle SPT.

Nous pouvons utiliser le logiciel LEKIN pour visualiser d'autres règles telles que EDD et la recherche locale :

- L'ordonnancement trouvé par la règle **EDD**.

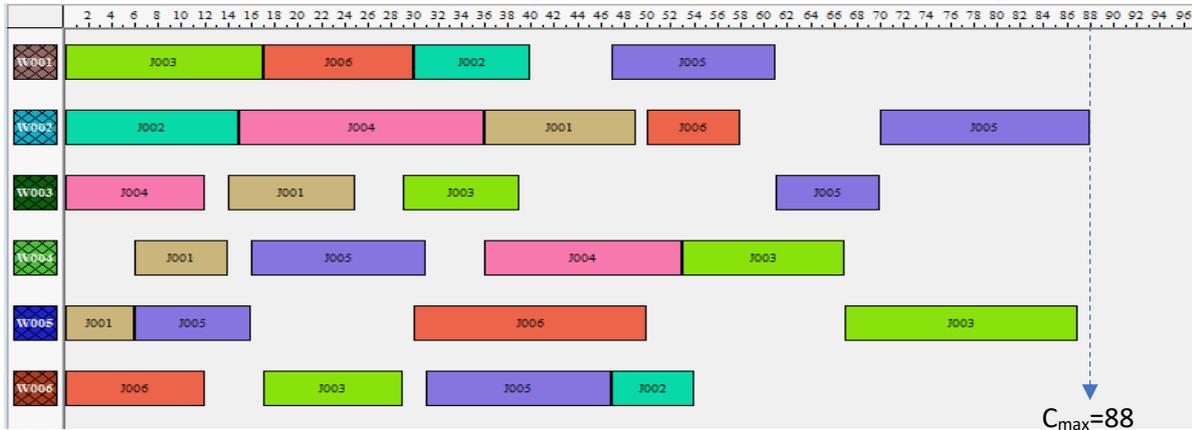


Figure 3-3 Diagramme de Gantt trouvé utilisant la règle EDD.

- L'ordonnancement trouvé par la **recherche locale** avec une fonction objective  $C_{max}$ .

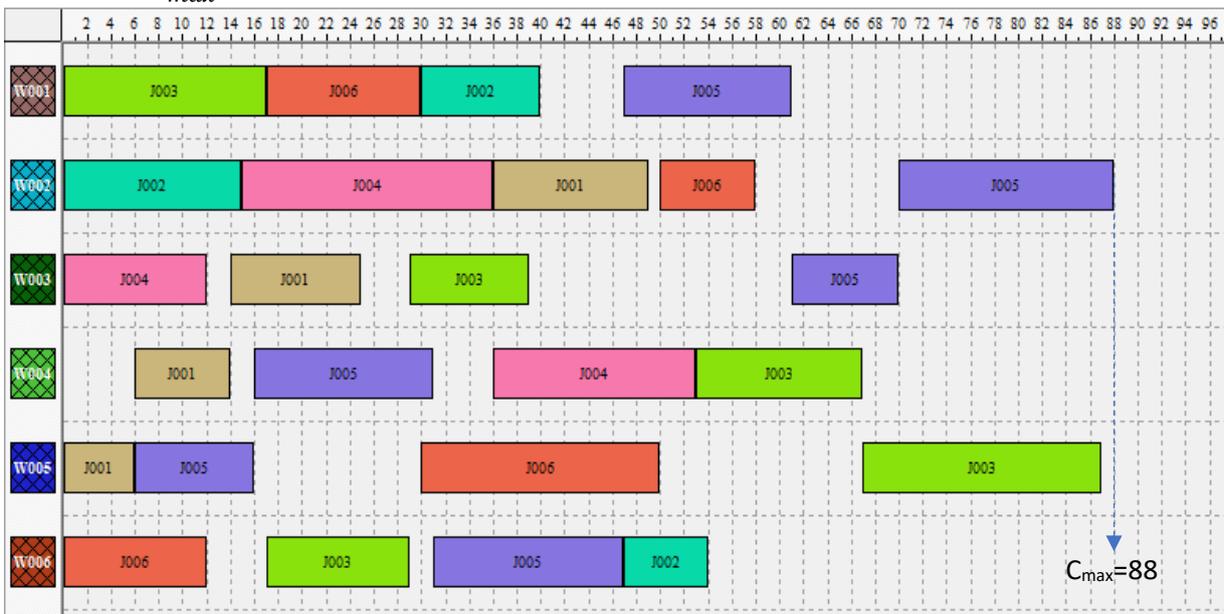


Figure 3-4 Diagramme de Gantt trouvé utilisant la recherche locale.

Avec le logiciel LEKIN, nous avons pu obtenir différentes solutions selon différentes règles de priorité. La figure 3-5 montre les valeurs de performance trouvée par chaque solution. Les règles EDD et FCFS nous donnent une bonne performance et résultat. Contrairement aux résultats obtenus en adoptant les règles SPT et WSPT.

Les valeurs trouvées par les règles LPT, MS et CR sont presque acceptable.

Et comme notre objectif dans ce travail est de minimiser le makespan nous faisons une comparaison entre les règles à cet égard (Figure 3-7), Les règles EDD et FCFS nous donnent le makespan minimum.

Schedule	Time	$C_{max}$	$T_{max}$	$\Sigma U_j$	$\Sigma C_j$	$\Sigma T_j$	$\Sigma w_j C_j$	$\Sigma w_j T_j$
EDD	1	88	88	6	465	465	465	465
FCFS	1	88	88	6	465	465	465	465
LPT	1	94	94	6	485	485	485	485
MS	1	94	94	6	485	485	485	485
CR	1	111	111	6	512	512	512	512
SPT	1	111	111	6	512	512	512	512
WSPT	1	111	111	6	512	512	512	512

Figure 3-5 les critères de performance trouvé par chaque règle.

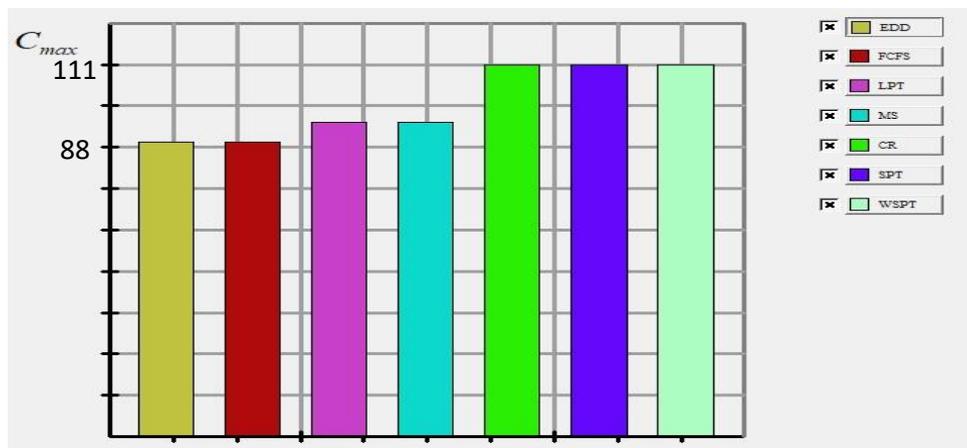


Figure 3-6 les makespan obtenus par chaque règle

En conclusion de cette comparaison, nous pouvons choisir la règle de priorité sur laquelle nous nous appuyerons dans la résolution de problème étudié et c'est la règle EDD.

Les routages sont donc donner à la manière présentée dans le tableau 3-3.

Pièce 1	Cell 5 (6) – Cell 4 (8) – Cell 3 (11) – Cell 2 (13)
Pièce 2	Cell 2 (15) – Cell 1 (10) – Cell 6 (7)
Pièce 3	Cell 1 (17) – Cell 6 (12) – Cell 3 (10) – Cell 4 (14) – Cell 5 (20)
Pièce 4	Cell 3 (12) – Cell 2 (21) – Cell 4 (17)
Pièce 5	Cell 5 (10) – Cell 4 (15) – Cell 6 (16) – Cell 1 (14) – Cell 3 (9) – Cell 2 (18)
Pièce 6	Cell 6 (12) – Cell 1 (13) – Cell 5 (20) – Cell 2 (8)

Tableau 3-3 Les routage de chaque pièce.

### 3.4 Présentation du problème :

Une grande partie de la théorie d'ordonnancement suppose que les machines sont toujours disponibles. Cette hypothèse n'est pas toujours vraie car la pratique de l'industrie montre des périodes où les machines sont indisponibles pour des opérations de maintenance, pour les changements d'outils, sans opérateurs, etc.

L'équipement est indisponible si, indépendamment de l'organisme de commande et en plus de la maintenance préventive, l'utilisation de l'équipement est empêchée en raison de la défaillance d'une pièce, d'un appareil ou d'une fonction activée, ou en raison du fait qu'un

autre élément du groupe est indisponible. Il est lié par des connexions fournies et entretenues par le propriétaire et est soumis à des travaux en cours au moment de la défaillance.

Alors nous étudions un problème de réordonnancement d'un atelier job shop flexible, où les tâches doivent être réordonnées lorsque les machines ne sont plus disponibles pendant un certain temps. Notre objectif est d'obtenir la meilleure alternative parmi la gamme de machines disponibles pour effectuer toutes les opérations nécessaires et assurer la continuité de la production d'un produit donné. Pendant l'exécution du plan de processus, des échecs de service, des échecs de reconfiguration ou d'autres événements se produisent. Cause possible d'indisponibilité de certaines machines Cette indisponibilité peut affecter le planning du processus ou le perturber.

Donc pour atteindre le but de cette étude nous proposons un algorithme de réordonnancement quand les machines deviennent indisponibles.

La figure suivante montre la procédure suivie pour résoudre le problème :

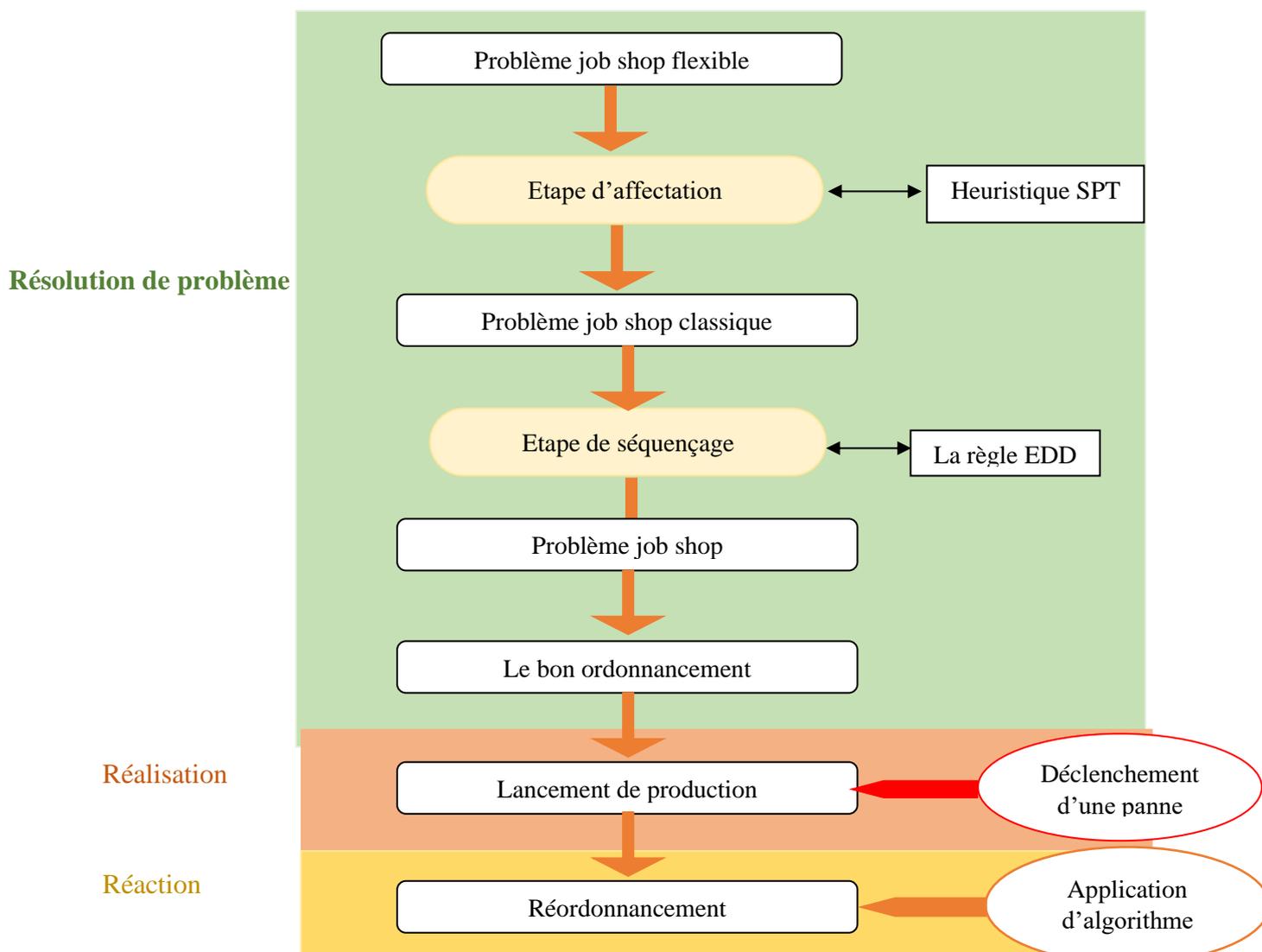


Figure 3-7 La démarche suivie dans la résolution.

### 3.5 Présentation d'algorithme proposé :

Dans cette partie de travail nous présentons l'algorithme de réordonnancement proposé, fournit un organigramme où nous montrons les différentes étapes à suivre pour l'appliquer en tant qu'outil de réacheminement en temps réel d'itinéraires alternatifs.

➤ **Contraintes :**

$$X_k = \begin{cases} 1 & \text{machine disponible} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Tf \ll TPM_{k'}$$

$$S = \min A_{k'}$$

➤ **Notation :**

$n$  : Nombre total des jobs.

$m$  : Nombre total des machines.

$n_i$  : Nombre total des opérations de jobs.

$i$  : indice de jobs =  $1, 2, \dots, n$ .

$j$  : Indice de la séquence d'opération  $j = 1, 2, \dots, n_i$

$k$  : indice de machine  $k = 1, 2, \dots, m$ .

$O_{ij}$  : La  $j$  ème opération du job  $i$

$p_{ijk}$  : Durée de traitement de  $O_{ij}$  sur la machine  $k$

$Tf_k$  : Temps d'attente dans la machine  $k$

$Tf_{k'}$  : Temps d'attente dans la machine  $k'$

$Tr_{kk'}$  : Temps de transport à partir de machine  $k$  vers  $k'$

$TPM_{k'}$  : Temps de maintenance préventive dans la machine  $k'$

#### 3.5.1 Les étapes d'algorithme :

Ci-dessous, nous montrons comment appliquer l'algorithme dans un système flexible de type job shop flexible afin de réordonnancer les tâches dans le cas d'indisponibilité des machines.

L'algorithme ressemble à ceci :

**Etape 01** : détection d'une machine indisponible ( $X_k = 0$ )

**Etape 02** : calcul de la somme de temps de traitement des pièces en attente dans la machine  $k$  et  $k'$

$$Tf_k = \sum_{k=1} p_{ijk}$$

$$Tf_{k'} = \sum_{k'=1} p_{ijk'}$$

**Etape 03 :** assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin

Par vérifier

$$Tf \ll TPM_{k'}$$

**Etape 04 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée

**Etape 05 :** Si la condition de l'étape 4 est vérifiée donc on calcule la somme :

$$A_{k'} = Tf_k + Tr_{kk'}$$

**Etape 06 :** Trouver le minimum  $A_{k'}$

**Etape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix.

**Etape 08 :** Traitement des pièces dans la nouvelle machine

**Etape 09 :** Sortie des pièces.

### 3.5.2 L'organigramme d'algorithme proposé :

Dans le but de minimiser le makespan et améliorer la performance du système lors d'indisponibilité des machines, nous avons développé alors l'organigramme suivant :

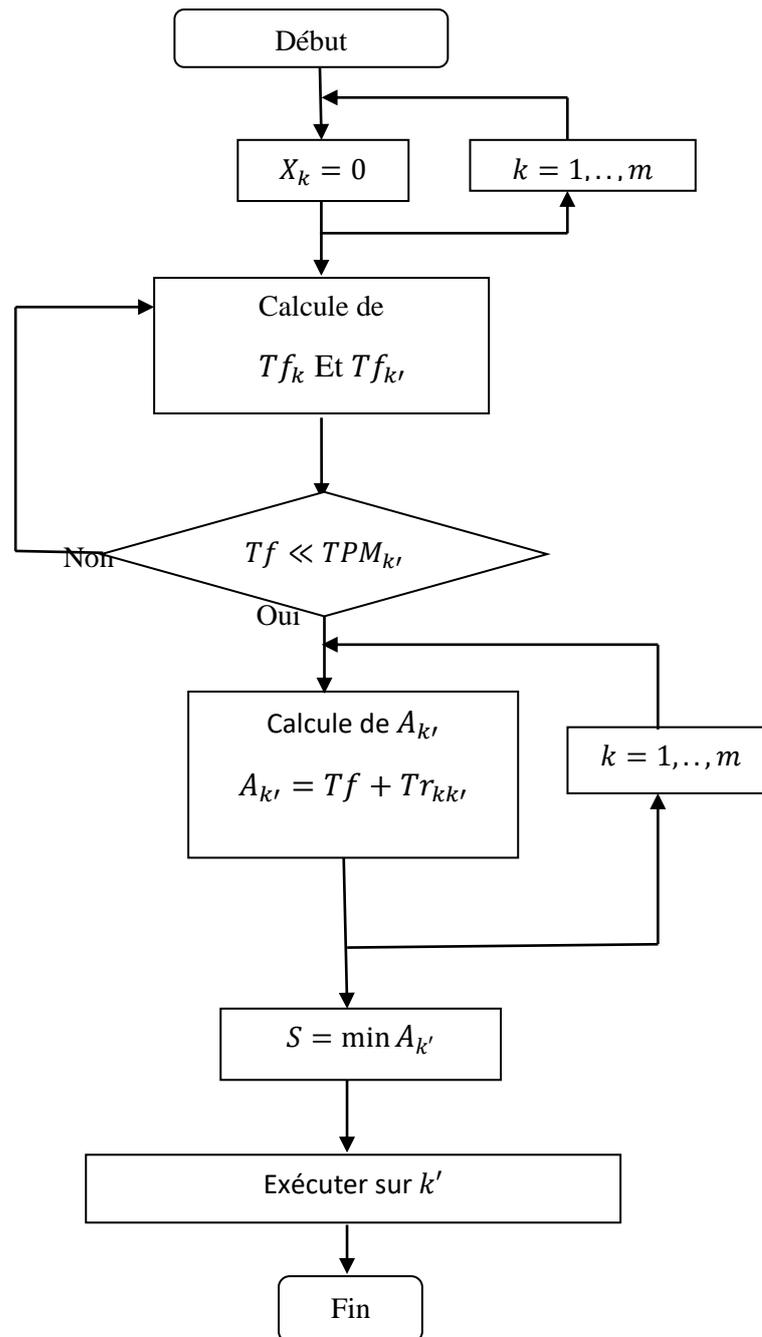


Figure 3-8 L'organigramme d'algorithme proposé.

### 3.6 Conclusion :

Dans cette section nous aborderons d'abord le système étudié avec sa modélisation puis nous avons présenté l'algorithme de réordonnancement proposé et nous avons fourni leur organigramme et expliqué son fonctionnement.

Notre but dans l'application de cet algorithme est de minimiser le makespan et améliorer la performance du système lors d'indisponibilité des machines.

Et de voir à quel point la méthode est efficace, nous avons étudié et simulé le système flexible décrit dans ce chapitre.

---

# **Chapitre IV :**

## **Simulation et analyse des résultats**

---

## 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons notre simulation, nous avons utilisé le logiciel Aréna, c'est un logiciel de simulation qui fournit un cadre intégré pour la création de modèles de simulation dans diverses applications. Les fonctions requises pour la modélisation incluent.

Arena est le logiciel leader du marché pour la simulation de flux d'événements discrets. Il est publié par Rockwell Automation et compte plus de 370.000 utilisateurs formés dans le monde. Arena est la version la plus avancée de la modélisation des systèmes de fabrication à ce jour. C'est le premier outil de modélisation utilisé pour analyser un grand nombre de logiques de commande complexes et d'équipements.

Un modèle de simulation ARENA a été élaboré pour illustrer la réalisation des opérations suivant le bon ordonnancement déterminé par les deux étapes précitées.

Par la suite, le déclenchement des pannes au niveau des machines provoque le lancement d'un algorithme que nous proposons pour minimiser le makespan.

Ce chapitre contient trois parties, la première est consacrée pour la simulation du système sans panne.

La deuxième présente la simulation en présence des pannes et aussi la comparaison avec les résultats trouvés par le logiciel LEKIN.

La troisième partie est consacrée pour la simulation en présence des pannes et avec l'application d'algorithme et la comparaison avec les différents résultats.

## 4.2 Représentation du système simulé sous Arena :

Nous montrons dans cette partie le modèle modélisé par ARENA.

La figure 4-1 présente le modèle FMS réalisé, nous avons montré différents postes de travail et deux stations de chargement (Order release) et de déchargement (Exit system).

- Le 1<sup>er</sup> cas de simulation : l'état idéal sans aucune panne.
- Le 2<sup>eme</sup> cas de simulation : nous interrogeons des pannes sans appliquer l'algorithme proposé.
- Le 3<sup>eme</sup> cas de simulation : nous appliquons l'algorithme proposé.

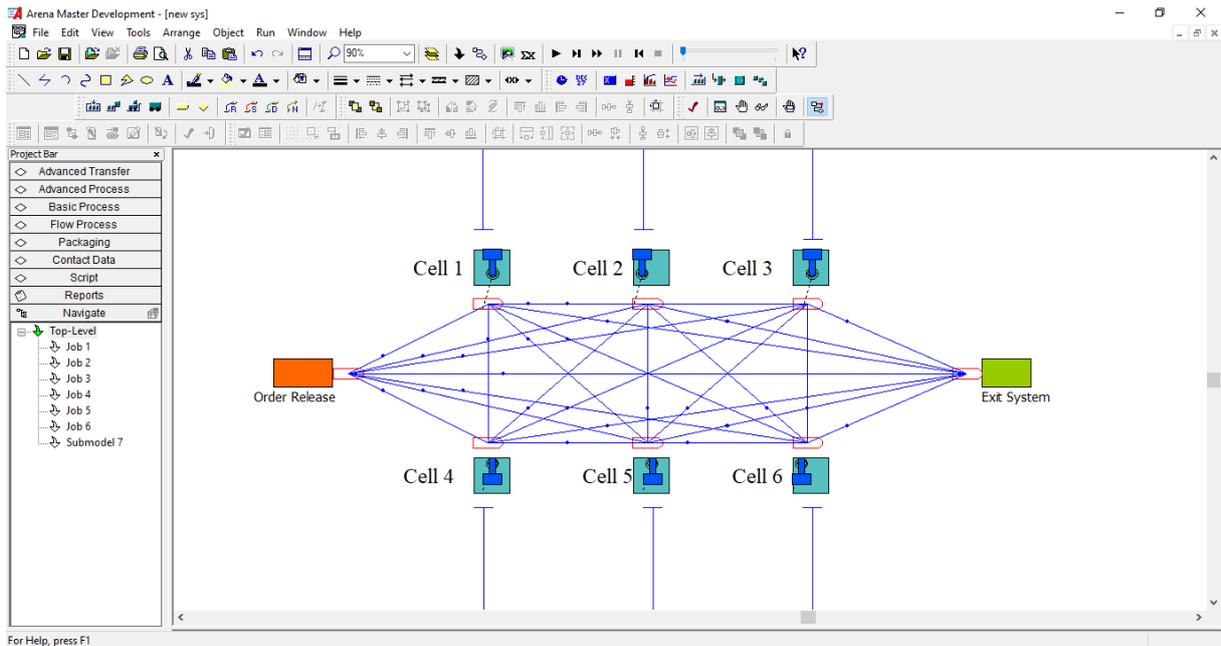


Figure 4-1 Configuration du système FMS.

Le modèle flexible contient 6 stations chaque station appartient une machine, à l'entrée du système nous avons une station de chargement et à la sortie nous avons une autre station de déchargement. Les stations de travail sont présentées dans la figure 4-2.

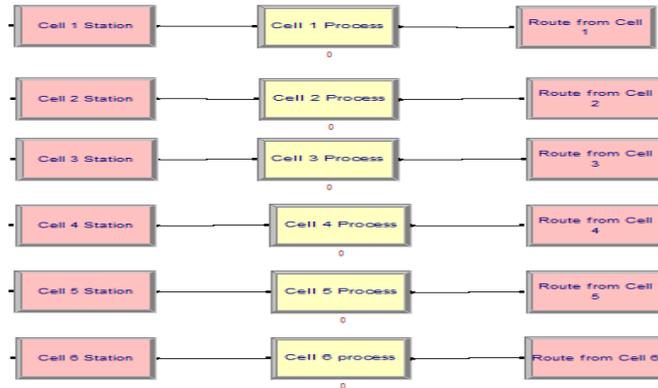


Figure 4-2 Représentation des stations de traitement

Le système produit 6 types de pièce, la figure 4-3 montre les jobs et la station de chargement, chaque sous modèle dans la figure représente un type de pièce.

Dans ses sous modèle nous introduisons les différentes données (les temps de traitement, les machines, les indice d'opérations) présentées dans le tableau 3-1

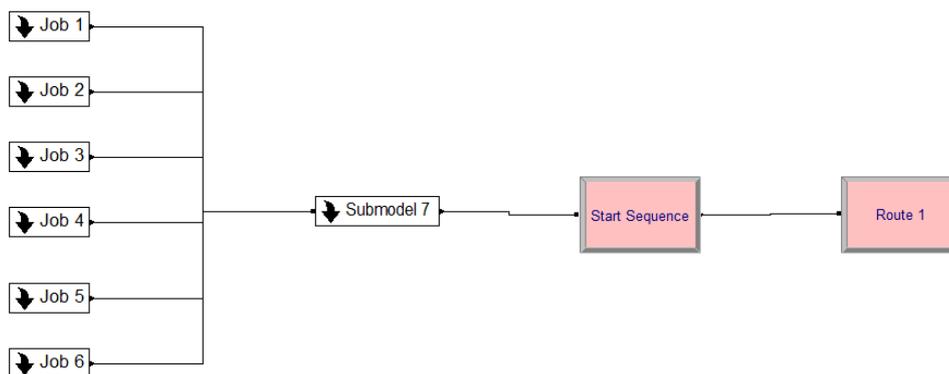


Figure 4-3 Représentation des jobs et la station d'entrée.

La figure 4-4 présente le sous modèle Job 1, Dans un premier temps, les données présentées dans le tableau 3-1 doivent être introduits. Pour cela, nous avons utilisé les modules ReadWrite (Le module ReadWrite est utilisé pour lire des données à partir d'un fichier d'entrée ou d'un clavier et attribuer des valeurs de données à une liste de variables ou de propriétés (ou d'autres expressions). Ce module est également utilisé pour écrire des données sur un périphérique de sortie, par exemple, lors de la lecture ou de l'écriture dans un fichier, la logique de lecture/écriture change en fonction du type d'action de lecture ou d'écriture en cours et du type d'accès.

Pour accéder aux différents fichiers, le type d'accès aux fichiers est spécifié dans le module Fichiers. Pour chaque opération les données sont les machines (File machine), le temps de traitement (File temps op) et les indices d'opérations (File ijk) (voir figure 4-5). Et nous avons applique la même méthode avec le reste des sous modèles (Job 2, Job 3, Job 4, Job 5 et Job 6).

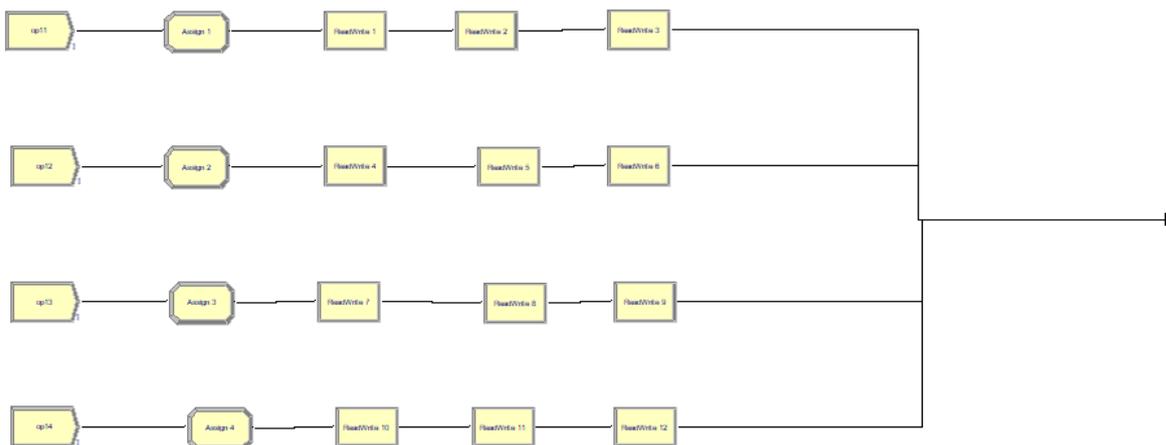


Figure 4-4 Représentation du sous modèle Job 1.

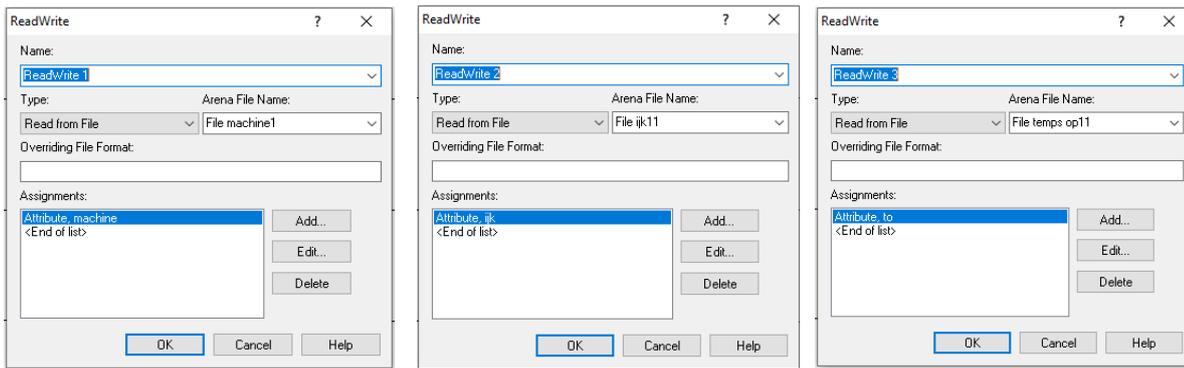


Figure 4-5 Fenêtre de dialogue des module ReadWrite.

Après l'initiation des données qui sont les temps de traitement de chaque opération au niveau de chacune des machines, Nous ajoutons le sous modèle (Submodel 7) figure 4-3.

La figure ci-dessous montre les différents modules qui composent Submodel 7, dans ce module nous allons arranger les opérations selon la règle voulue (Nous avons utilisé la règle SPT).

Le premier module utilisé est Decide (Ce module nous a permet de prendre des décisions dans le système et comprend des options pour prendre des décisions en fonction d'une ou plusieurs conditions) pour séparer les jobs (la condition est basée sur l'attribut job) et les opérations (la condition ici est basée sur l'attribut op) puis nous utilisons des Holds pour arranger les opérations selon leurs temps de traitement suivant une règle SPT (Lowest Attribute Value).

Le module Hold gardera les entités dans la file d'attente, un autre module Remove est utilisé pour retirer l'entité souhaitée pour l'utiliser dans les étapes suivantes.

Maintenant les jobs sont pratiquement prêts avec différentes caractéristiques : temps de traitement, séquences, couleurs. etc.

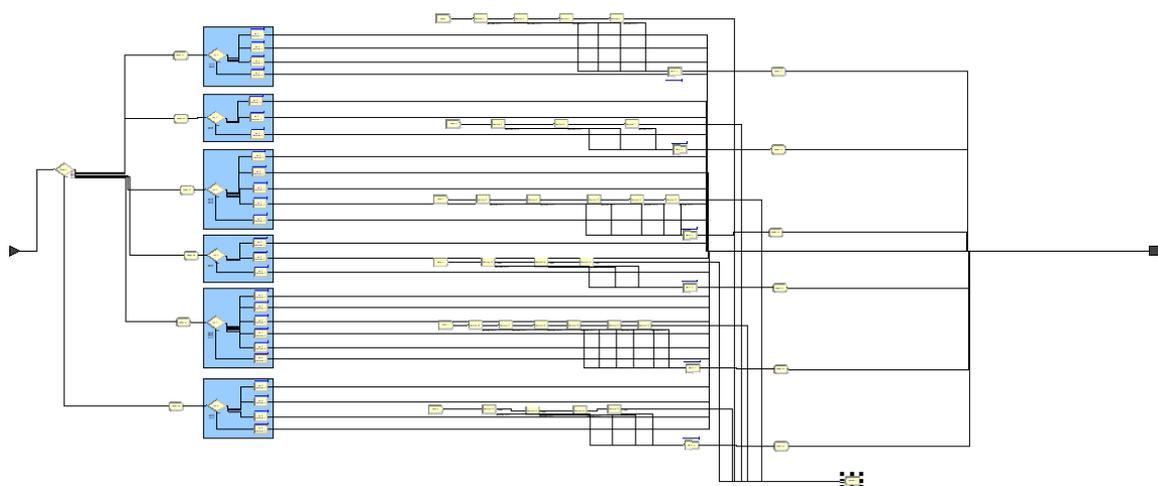


Figure 4-6 Représentation du sous modèle 7.

Ensuite nous introduisons les différents routages à l'aide de module Séquence figure 4-7.

Sequence - Advanced Transfer		
	Name	Steps
1 ▶	Part 1 Process Plan	5 rows
2	Part 2 Process Plan	4 rows
3	Part 3 Process Plan	6 rows
4	Part 4 Process Plan	4 rows
5	Part 5 Process Plan	7 rows
6	Part 6 Process Plan	5 rows

Figure 4-7 Représentation des routage suivés par chaque job.

La figure suivante montre la station d'exit de notre système.

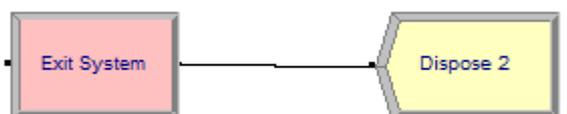


Figure 4-8 Représentation de la station de sortie.

### 4.3 Modélisation et simulation sans pannes :

Dans cette partie de notre travail, nous avons faits une modélisation et une simulation sans aucune interruption, afin de comparer les résultats donnés par le logiciel LEKIN et celles de notre simulation.

Au début et dans le premier cas (Cas 1), nous avons ignoré totalement les temps de manutention qu'elle désigne le transport ou l'entretien d'une charge qui nécessite l'effort physique d'une ou plusieurs personnes, cet effort peut être fait pour soulever, abaisser, pousser, tirer, transporter ou déplacer la charge. Le chargement et le déchargement font référence aux activités qui permettent de déplacer manuellement les palettes et les colis. Les progrès technologiques ont permis une utilisation plus efficace des tâches et des outils. Mais dans la deuxième section, nous l'avons pris en considération (Cas 2).

#### 4.3.1 Sans prendre en considération le temps de manutention :

À ce stade du travail, nous allons faire une modélisation et une simulation sans temps de transport.

##### 4.3.1.1 Résultats obtenus par LEKIN :

Dans cette partie du travail, durant la phase d'affectation, nous avons choisis d'affecter initialement les machines utilisées par une règle de priorité SPT. Dans la phase d'assignement, nous avons utilisé les règles EDD ou la recherche locale, ces deux règles

donne un  $C_{max}$  minimal comme trouvé précédemment. Dans le chapitre précédent nous avons trouvé le résultat suivant montré dans la figure 4-9 :

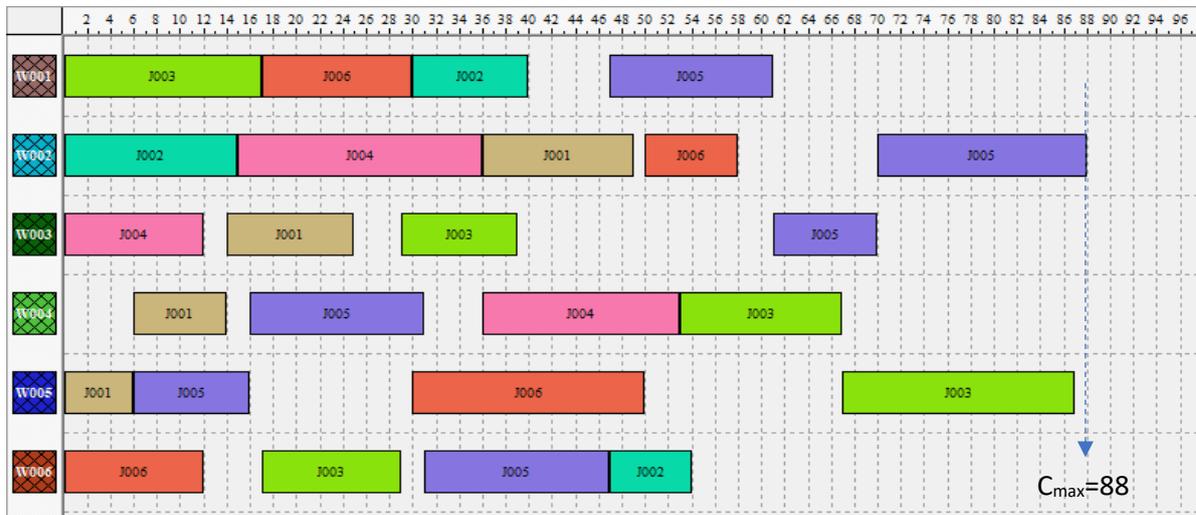


Figure 4-9 Diagramme de Gantt trouvé utilisant LEKIN

Selon cet ordonnancement des tâches, nous trouvons un temps de fin de la dernière opération  $C_{max} = 88$ .

#### 4.3.1.2 Simulation sur Arena :

Utilisons le modèle simulé sous Arena nous trouvons un  $C_{max} = 89 - 1 = 88$  (la simulation commence à instant égal à 1 min)

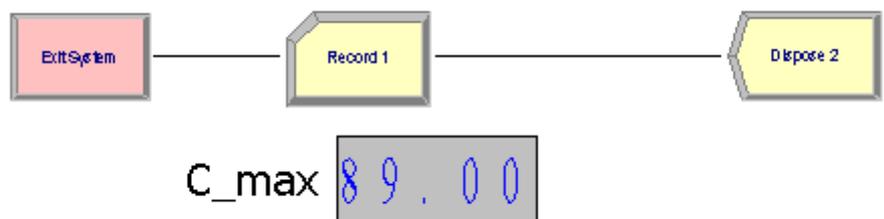


Figure 4-10 Temps de fin de la dernière tâche .

#### 4.3.2 Avec un temps de manutention fixe :

Dans cette partie de travail, nous prenons en considération les temps de transport des pièces entre les cellules et les stations d'entrée et de sortie.

$$Tr = 1 \text{ min.}$$

**4.3.2.1 Résultats obtenus par LEKIN :**

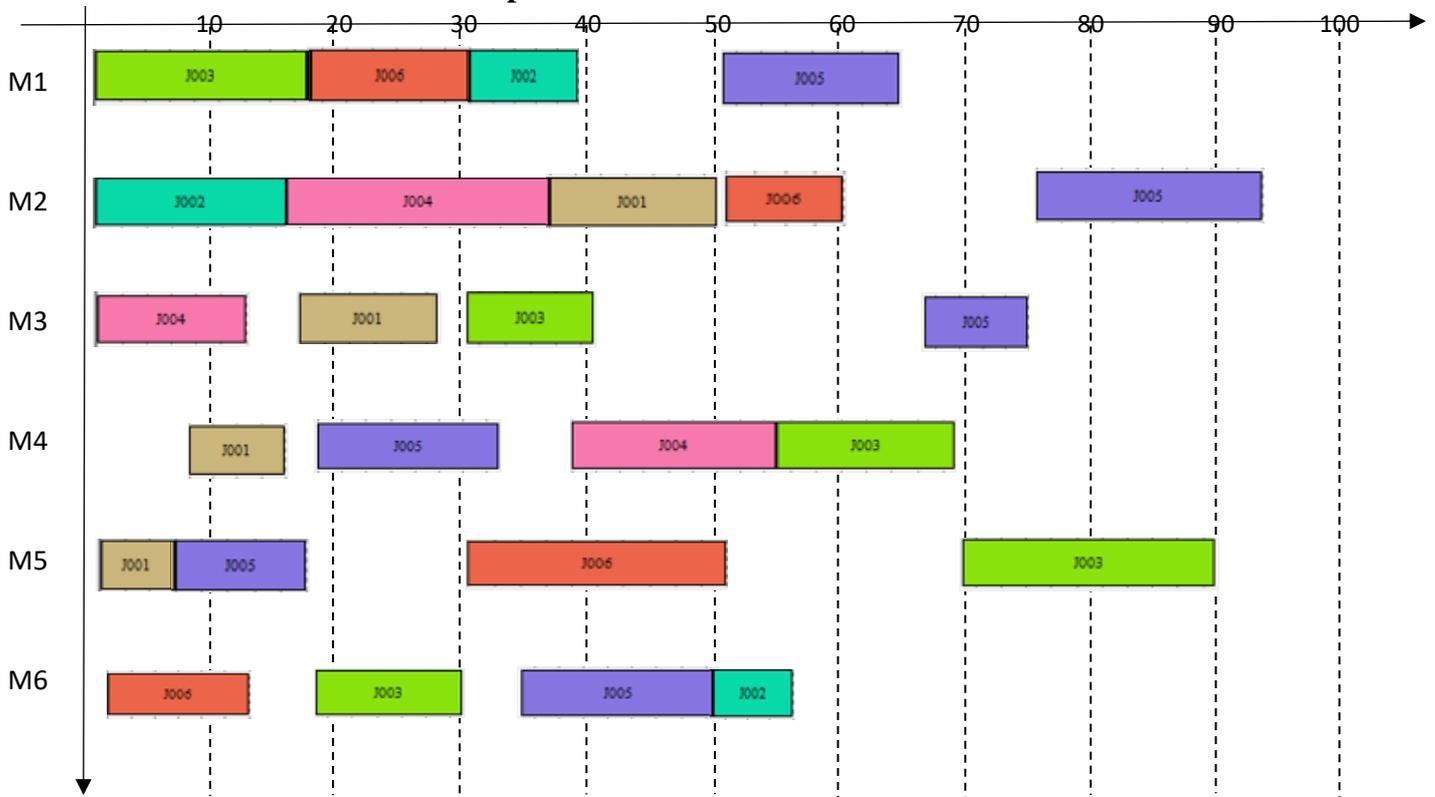


Figure 4-11 Ordonnancement avec un temps de maintenance.

Selon cet ordonnancement, le  $C_{max} = 95$

**4.3.2.2 Simulation**

Ajoutent les temps de route entre les stations du système dans la simulation nous avons trouvé le résultat suivant :

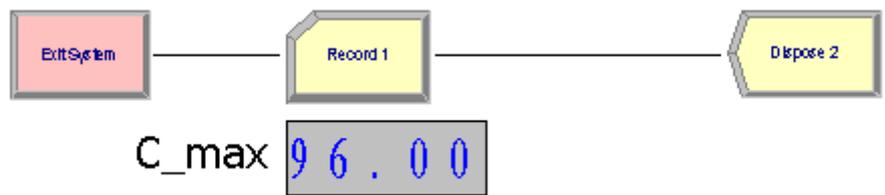


Figure 4-12 Le makespan trouvé ajoutons le temps de manutention.

$$C_{max} = 96 - 1 = 95.$$

**4.4 Modélisation et simulation en présence des pannes :**

Afin d'introduire l'effet de l'indisponibilité des machines et de la maintenance sur le système étudié, nous avons ajouté des défaillances au système :

- Panne 1 : à l'instant  $t = 30 \text{ min}$ . Temps de réparation est 75 min.

- Panne 2 : à  $t = 33 \text{ min}$  durant 67 min.
- Panne 3 : à l'instant  $t = 50 \text{ min}$ . Temps de réparation est 70 min

**4.4.1 Ordonnement avec la présence des pannes :**

Dans cette partie de travail, nous suggérerons que les machins M2, M4 et M6 tombent en panne (soit une panne qui nécessite une maintenance corrective ou un arrêt programmé pour une maintenance préventive). On utilise le logiciel LEKIN, l'ordonnement des tâches avec la présence des pannes est bien détaillé dans la figure 4-13.

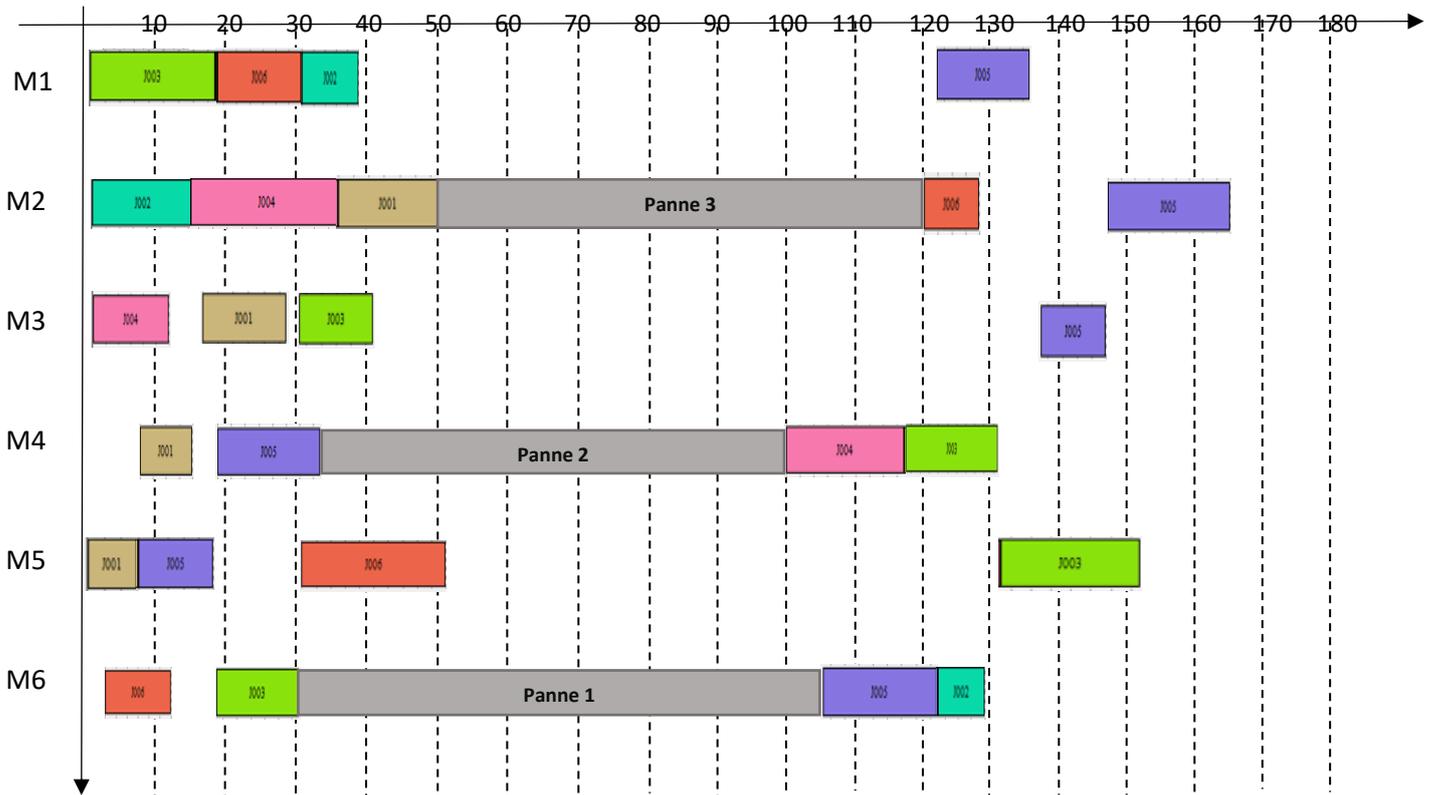


Figure 4-13 Diagramme de Gantt avec temps de transport.

$$C_{max} = 166$$

**4.4.2 Simulation :**

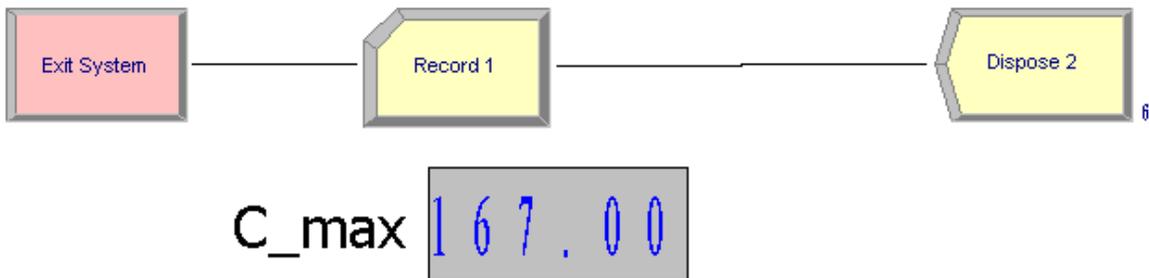
Dans cette section nous simulons notre système ajoutons les pannes proposées dans la partie précédente.

Pour introduire les différentes pannes sous le logiciel ARENA, nous avons utilisé le module « Failure » comme montrer dans la figure 4-15.

Failure - Advanced Process							
	Name	Type	Up Time	Up Time Units	Down Time	Down Time Units	Uptime in this State only
1	Failure 1	Time	31	Minutes	75	Minutes	
2	Failure 2	Time	34	Minutes	67	Minutes	
3 ▶	Failure 3	Time	51	Minutes	70	Minutes	<input type="text"/>

Figure 4-14 Dysfonctionnements qui se sont produits dans le système.

Le  $C_{max}$  trouver par la simulation :



$$C_{max} = 167 - 1 = 166$$

**4.4.3 Comparaison des résultats :**

Nous présentons au cours de ce paragraphe les résultats obtenus par la simulation grâce à des simulations menées dans les deux cas suivants : le 1<sup>er</sup> cas sans aucune interruption et le 2<sup>ème</sup> cas avec l’indisponibilité des machines.

- **Taux de production :**

Le taux d'utilisation des capacités de production (machines et équipements) est équivalent au taux entre les capacités de produire réellement utilisées pour la fabrication et la totalité des capacités de production éventuellement accessibles à un moment donné.

Ce critère de performance permet de déterminer le taux de fonctionnement d'une station de travail sans tenir comptes des périodes d'indisponibilité.

Sa formule est : le temps d'utilisation de la machine / le temps totale de service.

Le graphe dans la figure suivante représente les taux d'utilisation des machines dans notre système.

Cell 1 Machine	0.5625
Cell 2 Machine	0.7604
Cell 3 Machine	0.4375
Cell 4 Machine	0.5625
Cell 5 Machine	0.5208
Cell 6 Machine	0.5208

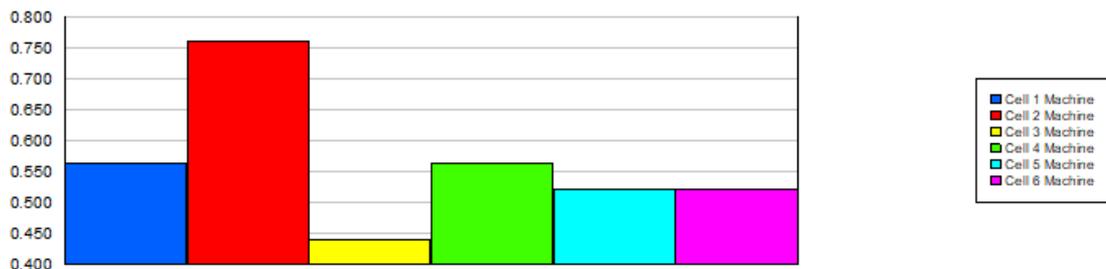


Figure 4-15 Les taux d'utilisation des machines sans interruptions.

Cell 1 Machine	0.3234
Cell 2 Machine	0.3832
Cell 3 Machine	0.2515
Cell 4 Machine	0.3234
Cell 5 Machine	0.2994
Cell 6 Machine	0.2814

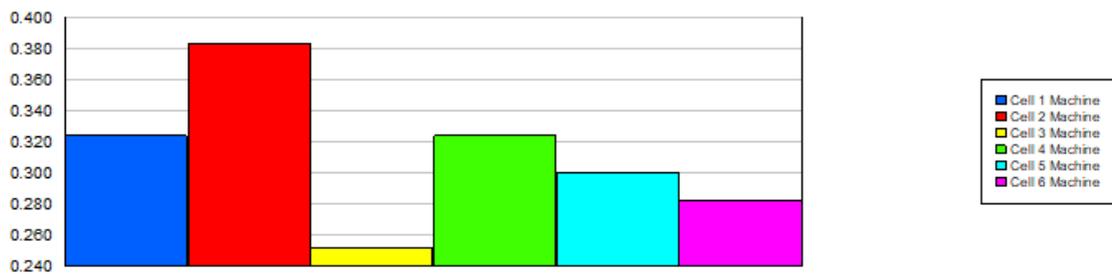


Figure 4-16 Les taux d'utilisation des machines avec interruptions.

- **Temps d'achèvement de chaque Job :**

La figure suivante représente une comparaison entre les graphes des temps de fin de réalisation de chaque job dans les deux cas. Ces graphes montrent l'augmentation des valeurs due à la présence des pannes dans le système étudié.

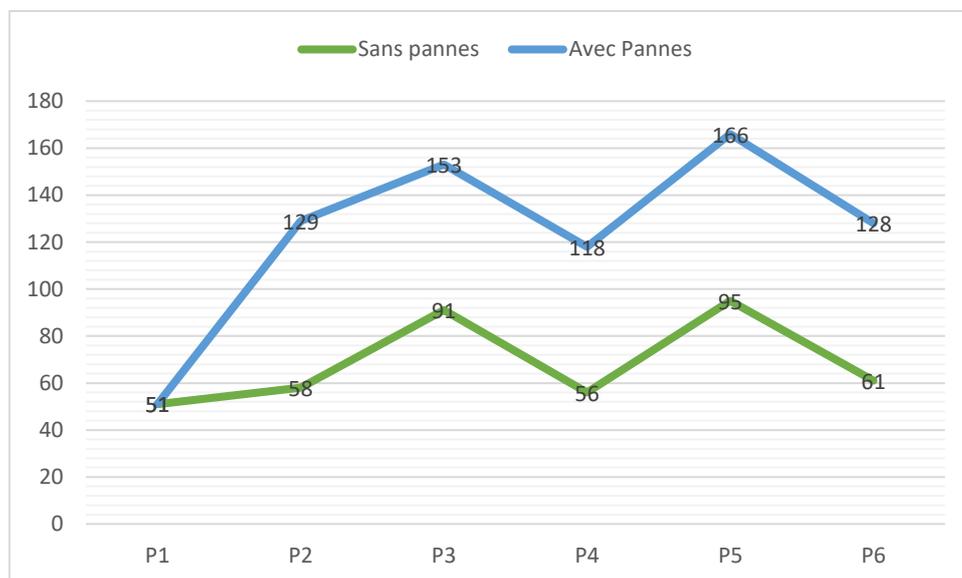


Figure 4-17 Les temps de fin de chaque Job.

- **Makespan :**

Le makespan ou  $C_{max}$  ("intervalle de temps") d'un processus est la durée qui doit être parcourue entre le commencement et la fin du travail.

Les processus de fabrication nécessitent souvent l'utilisation de deux machines ou plusieurs machines pour accomplir les tâches de fabrication. La durée de chaque activité sur chaque machine varie généralement. Lorsque nous avons plusieurs tâches à accomplir,

l'intervalle de production est le temps total nécessaire pour les accomplir. Calculer le makespan signifie de trouver la séquence de tâches qui minimisera le temps nécessaire.

Dans notre exemple étudié nous remarquons que les défaillances ajoutées au système ont prolongé le temps de travail entraînant une augmentation de la valeur du makespan.

#### 4.5 Modélisation utilisons l'algorithme proposé :

Afin de minimiser la date effective de fin de la dernière tâche, encore appelée makespan ou  $C_{max}$  dans le cas d'indisponibilité des machines, nous nous sommes appuyés sur les étapes d'algorithme proposé et développé dans le chapitre précédent.

##### 1. Panne 1 :

- La troisième opération du Job 5 ( $O_{53}$ ) :

**Etape 1 :** Détection de l'indisponibilité de la machine M6 à l'instant 30 min

$$X_6 = 0$$

**Etape 2 :** Calcule de la somme des temps de traitement des pièces en attente dans la machine 6 et les machines disponibles.

Les machines disponibles sont M1, M3 et M5

$$\begin{aligned} Tf_6 &= Tr_1 + TO_{536} \\ &= 105 + 16 \\ &= 121 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_1 &= \sum p_{ij1} + TO_{531} \\ &= 39 + 18 \\ &= 57 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_3 &= \sum p_{ij3} + TO_{533} \\ &= 41 + 30 \\ &= 71 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_5 &= \sum p_{ij5} + TO_{535} \\ &= 50 + 19 \\ &= 69 \end{aligned}$$

**Etape 3 :** Assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin.

**Etape 4 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée.

**Etape 5 :** dans ce cas les temps de transport sont les mêmes donc ce point n'influence pas sur le système.

Nous négligeons le temps de transport alors  $A_k = Tf_k$

**Etape 06 :** Trouver le minimum  $A_k$ ,

$$\min A_k = \min Tf_k = Tf_1 = 57$$

**Etape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix la machine 1

**Etape 08 :** Traitement de pièce dans la machine 1

**Etape 09 :** Sortie de pièce.

Le nouveau routage de Job 5 :

Pièce 5	Cell 5 (10) – Cell 4 (15) – Cell 1 (18) – Cell 1 (14) – Cell 3 (9) – Cell 3 (20)
---------	--

- La troisième opération du Job ( $O_{23}$ ) :

**Etape 1 :** Détection de l'indisponibilité de machine M6 à instant 30 min

$$X_6 = 0$$

**Etape 2 :** Calcule de la somme de temps de traitement des pièces en attente dans la machine 6 et les machines disponibles.

Les machines disponibles sont M1, M3 et M5

$$Tf_6 = Tr_1 + TO_{236}$$

$$= 105 + 7$$

$$= 112$$

$$Tf_1 = \sum p_{ij1} + TO_{236}$$

$$= 71 + 11$$

$$= 82$$

$$Tf_3 = \sum p_{ij3} + TO_{233}$$

$$= 41 + 9$$

$$= 50$$

$$Tf_5 = \sum p_{ij5} + TO_{535}$$

$$= 50 + 14$$

$$= 64$$

**Etape 3 :** Assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin.

**Etape 4 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée.

**Etape 5 :** Dans ce cas les temps de transport sont les mêmes donc ce point n'influence pas sur le système.

Nous néglignons le temps de transport alors  $A_k = T f_k$

**Etape 06 :** Trouver le minimum  $A_k$ ,

$$\min A_k = \min T f_k = T f_2 = 50$$

**Etape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix la machine 3

**Etape 08 :** Traitement de pièce dans la machine 1

**Etape 09 :** Sortie des pièces.

Le nouveau routage de Job 2 :

Pièce 2	Cell 2 (15) – Cell 1 (10) – Cell 3 (9)
---------	--

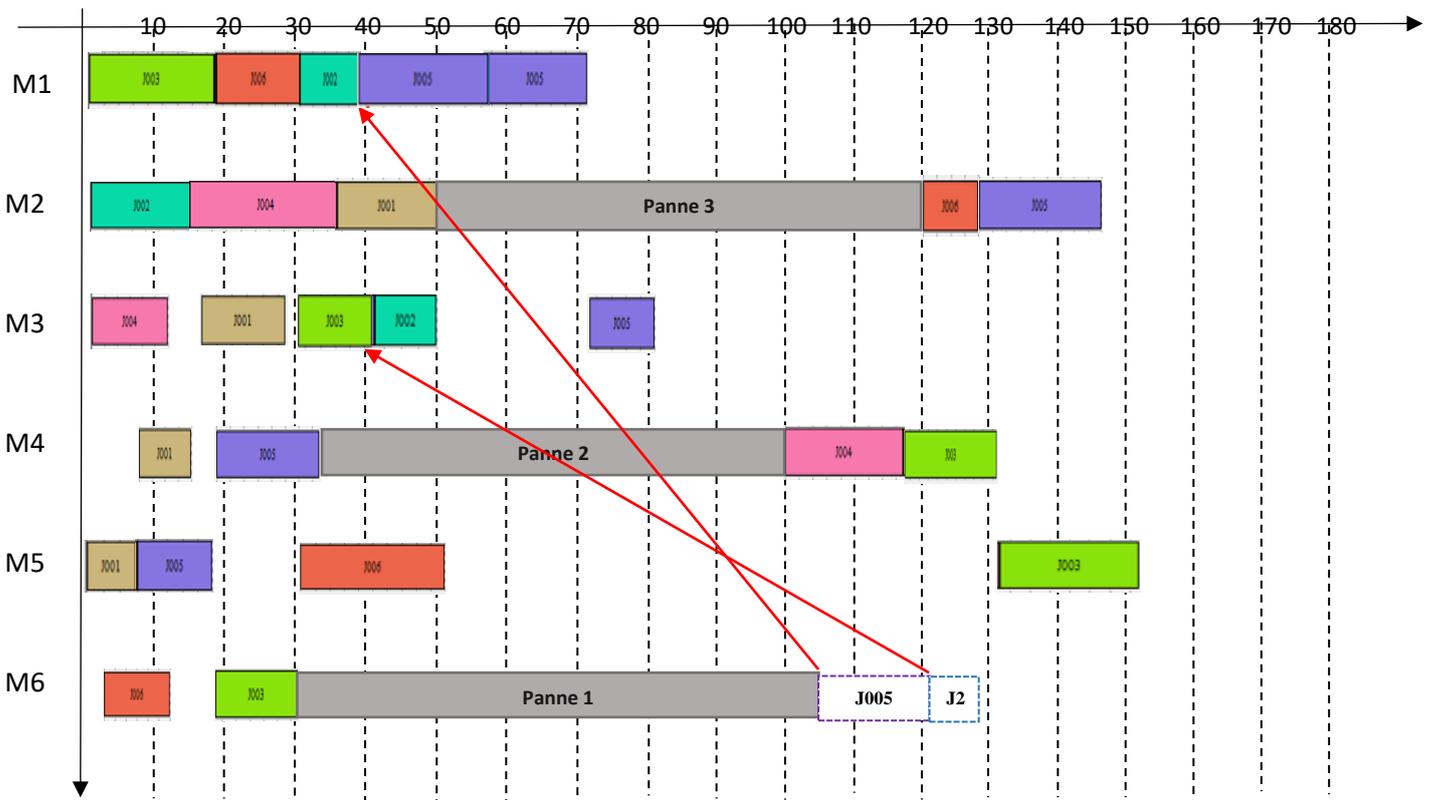


Figure 4-18 Changement de routage des pièces 5 et 2.

**2. Panne 2 :**

- La troisième opération du Job 4 ( $O_{43}$ ) :

**Etape 1 :** Détection de l'indisponibilité de la machine M4 à instant 34 min.

$$X_4 = 0$$

**Etape 2 :** Calcule de la somme de temps de traitement des pièces en attente dans la machine 6 et les machines disponibles.

Les machines disponibles sont M1, M3 et M5

$$\begin{aligned} Tf_4 &= Tr_1 + TO_{434} \\ &= 100 + 17 \\ &= 117 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_1 &= \sum p_{ij1} + TO_{431} \\ &= 71 + 19 \\ &= 90 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_3 &= \sum p_{ij3} + TO_{433} \\ &= 40 + 20 \\ &= 60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_5 &= \sum p_{ij5} + TO_{435} \\ &= 50 + 14 \\ &= 64 \end{aligned}$$

**Etape 3 :** Assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin.

**Etape 4 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée.

**Etape 5 :** Dans ce cas les temps de transport sont les mêmes donc ce point n'influence pas sur le système.

Nous négligions le temps de transport alors  $A_k = Tf_k$

**Etape 06 :** Trouver le minimum  $A_k$ ,

$$\min A_k = \min Tf_k = Tf_3 = 60$$

**Etape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix la machine 3

**Etape 08 :** Traitement de pièce dans la machine 3

**Etape 09 :** Sortie de pièce 4.

Le nouveau routage du Job 4 :

Pièce 4	Cell 3 (12) – Cell 2 (21) – Cell 3 (20)
---------	---

- La cinquième opération du Job 3 ( $O_{35}$ ) :

**Étape 1 :** Détection de l'indisponibilité de la machine M4 à instant 34 min.

$$X_4 = 0$$

**Étape 2 :** Calcule de la somme de temps de traitement des pièces en attente dans la machine 6 et les machines disponibles.

Les machines disponibles sont M1, M3 et M5

$$\begin{aligned} Tf_4 &= Tr_1 + TO_{354} \\ &= 100 + 14 \\ &= 114 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_1 &= \sum p_{ij1} + TO_{351} \\ &= 71 + 25 \\ &= 95 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_3 &= \sum p_{ij3} + TO_{353} \\ &= 81 + 28 \\ &= 109 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_5 &= \sum p_{ij5} + TO_{355} \\ &= 51 + 20 \\ &= 71 \end{aligned}$$

**Étape 3 :** Assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin.

**Étape 4 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée.

**Étape 5 :** Dans ce cas les temps de transport sont les mêmes donc ce point n'influence pas sur le système.

Nous négligeons le temps de transport alors  $A_k = Tf_k$

**Étape 06 :** Trouver le minimum  $A_k$ ,

$$\min A_k = \min Tf_k = Tf_5 = 60$$

**Étape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix la machine 5

**Étape 08 :** Traitement de pièce dans la machine 5

**Étape 09 :** Sortie de pièce 3.

Le nouveau routage du Job 3 :

Pièce 3	Cell 1 (17) – Cell 6 (12) – Cell 3 (10) – Cell 5 (20) – Cell 5 (20)
---------	---

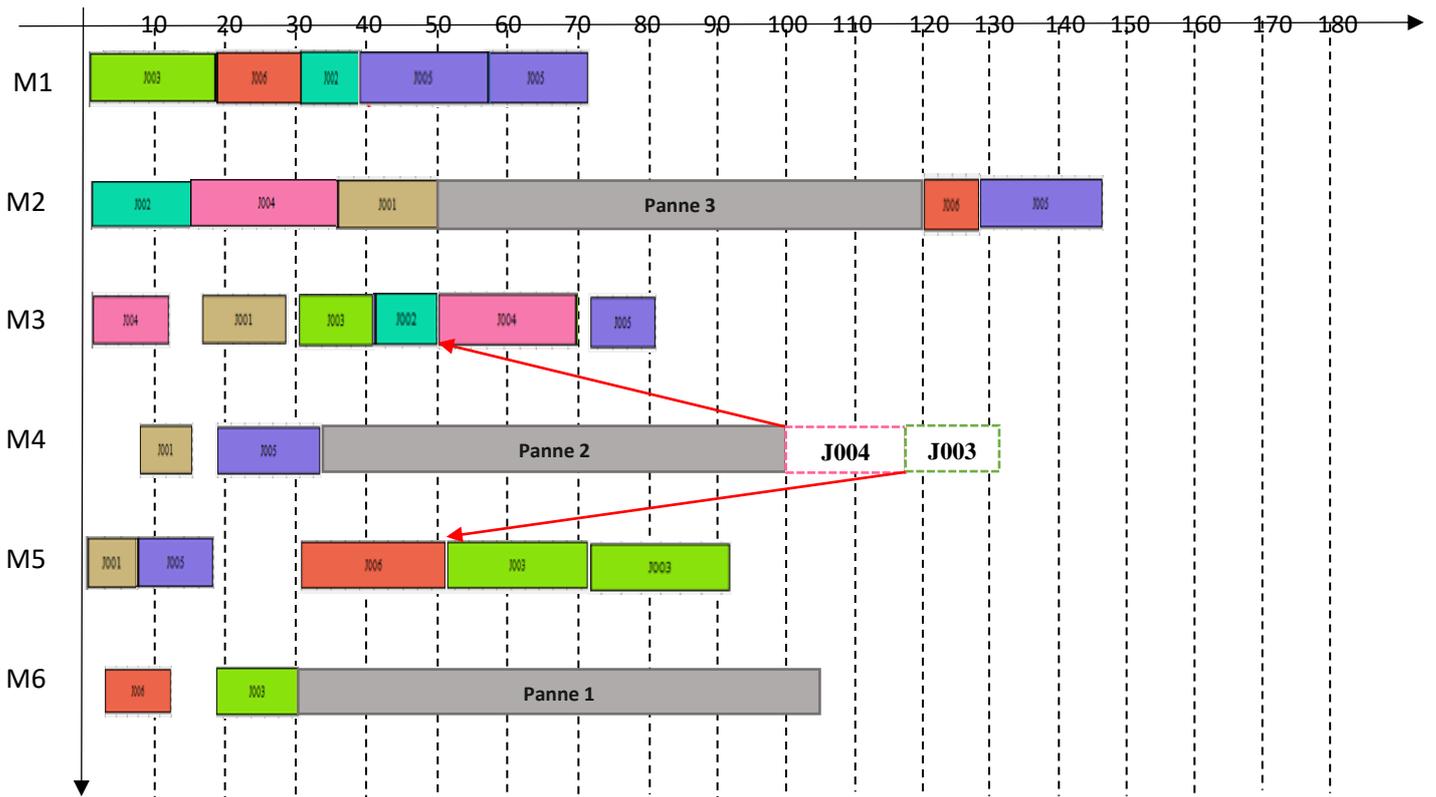


Figure 4-19 Changement de routage des pièces 4 et 3.

### 3. Panne 3:

- La quatrième opération du Job 6 ( $O_{64}$ ) :

**Étape 1 :** Détection de l'indisponibilité de machine M2 à instant 50 min

$$X_2 = 0$$

**Étape 2 :** Calcul de la somme de temps de traitement des pièces en attente dans la machine 6 et les machines disponibles.

Les machines disponibles sont M1, M3 et M5

$$\begin{aligned} Tf_2 &= Tr_1 + TO_{642} \\ &= 120 + 8 \\ &= 128 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_1 &= \sum p_{ij1} + TO_{641} \\ &= 71 + 10 \\ &= 81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Tf_3 &= \sum p_{ij3} + TO_{643} \\ &= 81 + 12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 93 \\
 Tf_5 &= \sum p_{ij5} + TO_{645} \\
 &= 91 + 10 \\
 &= 85
 \end{aligned}$$

**Etape 3 :** Assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin.

**Etape 4 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée.

**Etape 5 :** Dans ce cas les temps de transport sont les mêmes donc ce point n'influence pas sur le système.

Nous négligeons le temps de transport alors  $A_k = Tf_k$

**Etape 06 :** Trouver le minimum  $A_k$ ,

$$\min A_k = \min Tf_k = Tf_1 = 81$$

**Etape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix la machine 1.

**Etape 08 :** Traitement de pièce dans la machine 1.

**Etape 09 :** Sortie de pièce 6.

Le nouveau routage du Job 6 :

Pièce 6	Cell 6 (12) – Cell 1 (13) – Cell 5 (20) – Cell 1 (10)
---------	---

- La sixième opération du Job 5 ( $O_{56}$ ) :

**Etape 1 :** Détection à instant 50 min l'indisponibilité de machine M2 :  $X_2 = 0$

**Etape 2 :** Calcule de la somme de temps de traitement des pièces en attente dans la machine 6 et les machines disponibles.

Les machines disponibles sont M1, M3 et M5

$$\begin{aligned}
 Tf_2 &= Tr_1 + TO_{562} \\
 &= 120 + 18 \\
 &= 138 \\
 Tf_1 &= \sum p_{ij1} + TO_{561} \\
 &= 81 + 37 \\
 &= 118 \\
 Tf_3 &= \sum p_{ij3} + TO_{563} \\
 &= 81 + 36
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 117 \\
 Tf_5 &= \sum p_{ij5} + TO_{565} \\
 &= 91 + 26 \\
 &= 117
 \end{aligned}$$

**Etape 3 :** Assurer que le temps d'atteindre une maintenance préventive est loin.

**Etape 4 :** Si la condition précédente n'est pas vérifiée.

**Etape 5 :** Dans ce cas les temps de transport sont les mêmes donc ce point n'influence pas sur le système.

Nous négligeons le temps de transport alors  $A_k = Tf_k$

**Etape 06 :** Trouver le minimum  $A_k$ ,

$$\min A_k = \min Tf_k = Tf_3 = Tf_5 = 117$$

**Etape 07 :** Changement de la machine vers le meilleur choix la machine 3 ou la machine 5.

**Etape 08 :** Traitement de pièce dans la machine 5.

**Etape 09 :** Sortie de pièce 5.

Le nouveau routage du Job 5 :

Pièce 5	Cell 5 (10) – Cell 4 (15) – Cell 1 (17) – Cell 1 (14) – Cell 3 (9) – Cell 3 (20)
---------	--

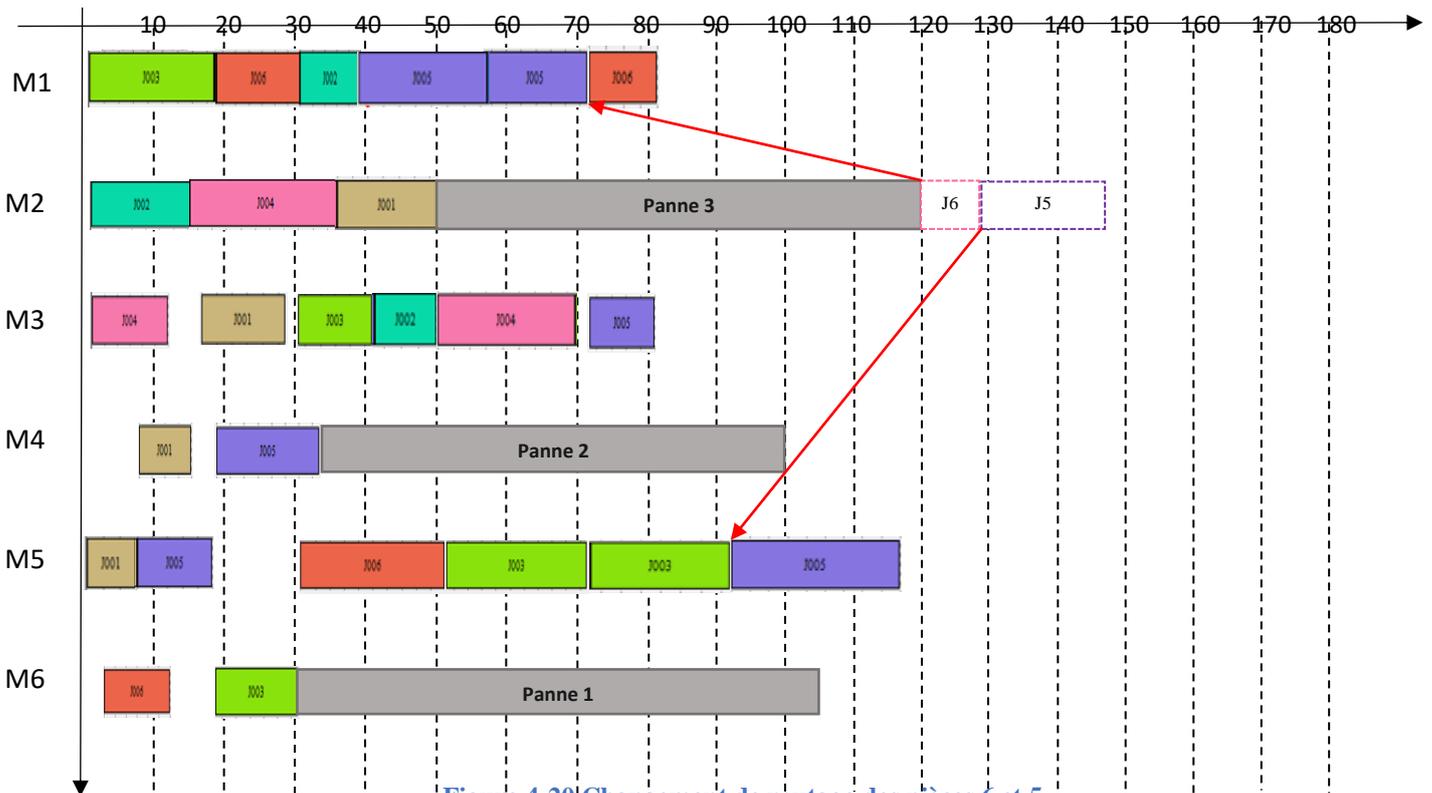


Figure 4-20: Changement de routage des pièces 6 et 5.

Le  $C_{max}$  trouvé après l'application d'algorithme de réordonnancement est :

$$C_{max} = 118.$$

#### 4.6 Implantation de l'algorithme dans la simulation :

Dans cette partie de notre projet, nous réalisons une nouvelle simulation utilisons l'algorithme de réordonnancement.

Tout d'abord, nous ajoutons des modules Decide dans les cellules qui précèdent les cellules où les défaillances se sont produites (Figure 4-21).

Dans notre cas ses cellules sont Cell 1, Cell 2 Cell 3, Cell 4 et Cell 5.

Le premier module Decide pour la condition pièce (Figure 4-22) le deuxième module Decide pour la condition de disponibilité de machine (Figure 4-23).

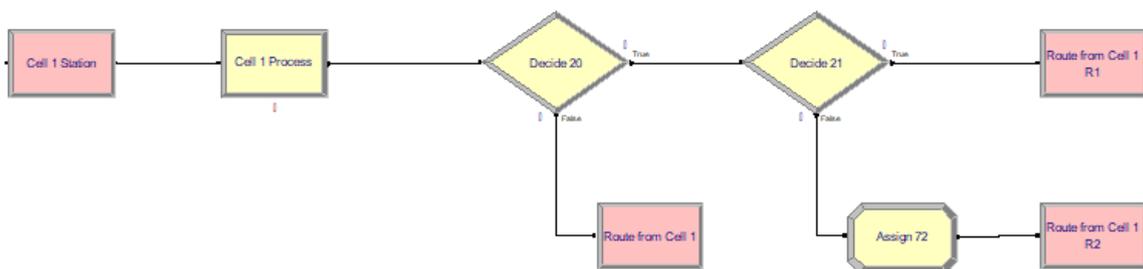


Figure 4-21 Représentation de station 1 après l'implantation d'algorithme.

Figure 4-22 Représentation de la première condition.

Quand la machine est indisponible  $IRF$  (*nom de machine*) = -4 donc la pièce va changer le chemin vers la machine disponible la plus proche et avec le plus petit temps opératoire.

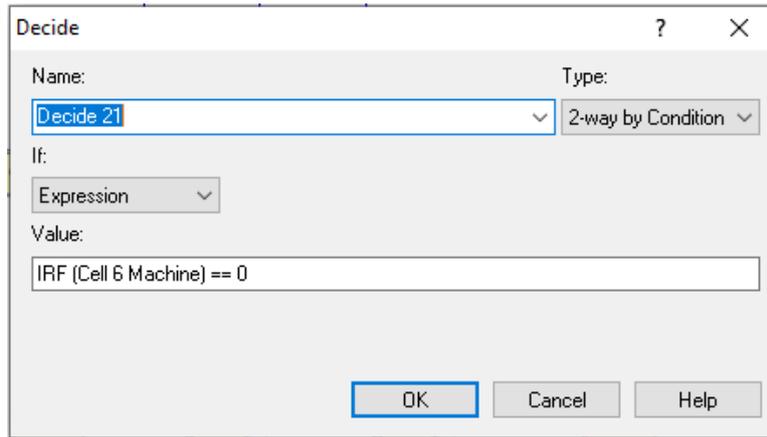


Figure 4-23 Représentation de la deuxième condition.

Le nouveau séquençement est donné aux pièces par un module Assign qui suit le deuxième Decide. Dans la simulation, les nouveaux routages sont introduits dans le module sequence (Figure 4-24)

Sequence - Advanced Transfer		
	Name	Steps
1	Part 1 Process Plan	5 rows
2	Part 2 Process Plan	4 rows
3	Part 3 Process Plan	6 rows
4	Part 4 Process Plan	4 rows
5	Part 5 Process Plan	7 rows
6	Part 6 Process Plan	5 rows
7	Part 2 Process Plan1	2 rows
8	Part 3 Process Plan1	2 rows
9	Part4 Process Plan1	2 rows
10	Part 5 Process Plan1	4 rows
11 ▶	Part 6 Process Plan 1	2 rows

Figure 4-24 Les nouvelles séquences ajoutées au simulation.

Après le réordonnancement des séquences des pièces, le makespan trouvé égal à :

$$C_{max} = 119 - 1 = 118$$

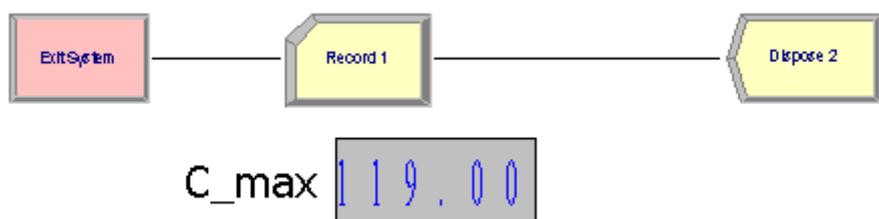


Figure 4-25 Le makespan trouvé par la simulation.

#### 4.7 Interprétation et comparaison des résultats :

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus, Après application de l'algorithme de réordonnancement.

Pour indiquer les améliorations obtenues en implémentant l'algorithme proposé de réordonnancement, Une étude comparative a été effectuée entre, d'une part, les résultats obtenus par la simulation sans réordonnancement des tâches et, d'autre part, les résultats obtenus par la simulation avec la mise en œuvre de l'algorithme.

Le principal objectif de l'utilisation de cet algorithme de réordonnancement consiste à améliorer et optimiser le fonctionnement du système étudié. Et c'est en dévaluant le makespan.

Les critères que nous avons étudiés :

- Le taux d'utilisation des machines.
- La makespan

##### 4.7.1 Taux d'utilisation des machines :

Le taux d'utilisation des machines est défini comme le pourcentage de la capacité de fabrication réellement utilisée et la capacité de fabrication totalement accessible à un instant précis.

Cet indicateur de performance permet de mesurer la performance des ressources et l'efficacité des process.

La figure suivante représente les taux d'utilisation des machines pour chaque cas.

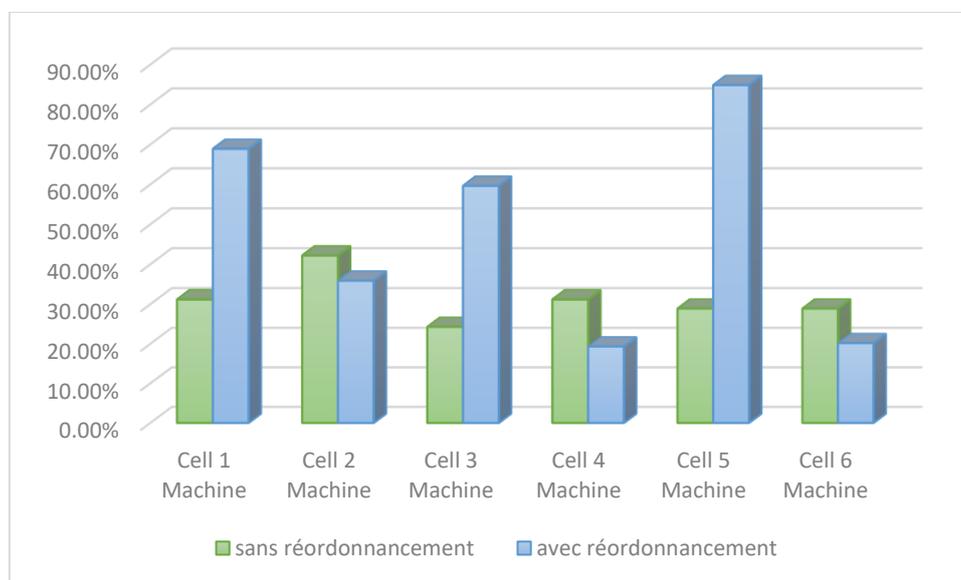


Figure 4-26 Taux d'utilisation des machines.

Nous remarquons une bonne augmentation des taux d'utilisation des machines qui sont disponible et diminution au niveau des machines indisponible.

#### 4.7.2 Makespan :

Le temps qui passe entre le démarrage et la fin d'une séquence d'opérations dans une série de machines.

La minimisation du makespan est importante dans les situations où un lot de travaux est reçu et doit être achevé le plus rapidement possible. Par exemple, une commande de plusieurs articles soumise par un seul client qui doit être livrée le plus tôt possible.

Les graphes dans la figure 4-26 montre l'amélioration réalisée en termes du temps de sortie de chaque job.

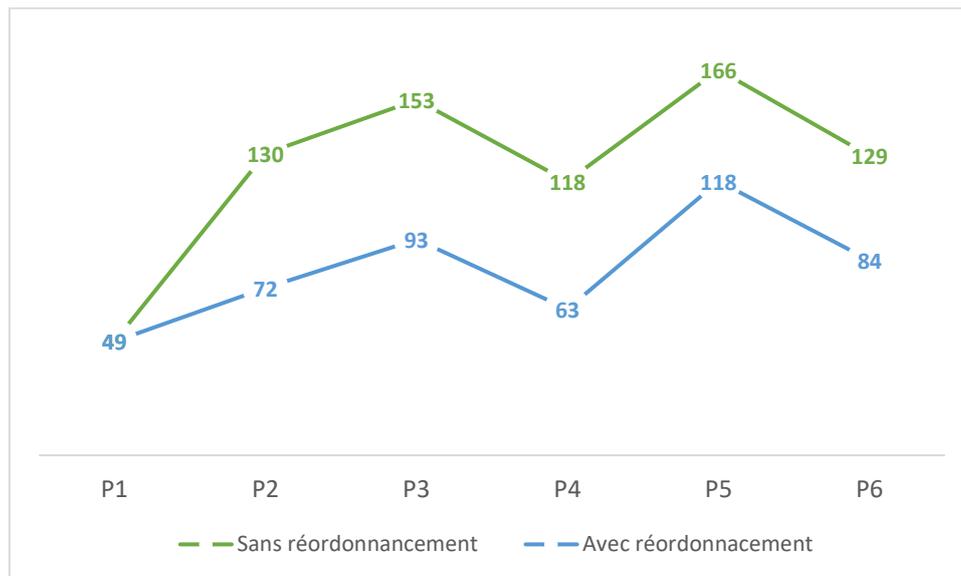


Figure 4-27 Temps d'achèvement des pièces sans et avec le réordonnement.

Le but principal de notre étude est de trouver la résolution optimale pour un problème d'ordonnement de type job shop flexible et c'est ce que nous avons vu dans le troisième chapitre et de trouver un algorithme qui nous aide à réagir dans le cas d'indisponibilité des machines.

En conclusion de cette dernière partie, nous ne pouvons confirmer que la démarche suivie a donné des bons résultats par la diminution du makespan.

#### 4.8 Conclusion :

Nous avons d'abord abordé dans ce chapitre la présentation du modèle simulé par ARENA, en donnant les différentes stations utilisées, et ensuite nous avons exposé en détail les résultats obtenus ainsi que les explications fournies par les diverses simulations réalisées.

L'utilisation d'algorithme de réordonnement a donné des bons résultats au système ce qui a conduit à augmenter la performance et le rendement du système de production, Il a considérablement augmenté les performances du système de production en diminuant le makespan et par conséquent en augmentant ainsi le taux de production.

## *Conclusion Générale :*

La résolution de problèmes d'ordonnancement d'ateliers de type job-shop flexible sous contraintes d'indisponibilité des machines est une contribution majeure du travail que nous avons rassemblé dans ce mémoire.

Dans ce projet, nous nous intéressons à l'aspect des services industriels, qui joue aujourd'hui un rôle déterminant dans la conduite de la production industrielle, a pris une place clé dans les entreprises manufacturières et manufacturières, perdant progressivement de son importance. Il est important de noter que les coûts de maintenance des équipements industriels ont augmenté de manière significative, ce qui se reflète dans le budget.

Notre défi dans ce travail est d'améliorer les routages pour améliorer la productivité et l'efficacité des systèmes de fabrication flexibles tout en minimisant le makespan.

Notre intervention aborde deux points essentiels, le premier est de trouver la solution optimale d'un problème d'ordonnancement de type job shop flexible. Le deuxième est de la réaction d'un système totalement flexible avec l'indisponibilité des machines.

Pour cette raison, un système de production flexible a été modélisé à l'aide du logiciel ARENA. Dans le but de déterminer l'algorithme proposé et les changements observés dans le système de production.

Nous commençons d'abord par la proposition d'un système flexible de type job shop pour y appliquer notre méthode de résolution ; La méthode proposée a montré des performances supérieures au niveau de la production et du taux de rendement des machines.

Ensuite, nous avons introduit quelques défaillances et pannes dans le système et noté les changements observés.

Puis nous avons proposé un algorithme de réordonnancement qui nous aide à trouver le meilleur routage en cas d'indisponibilité des machines.

Par la suite nous avons simulé le système avec les deux cas le cas idéal et avec la contrainte d'indisponibilité des machines. Les résultats obtenus après cette simulation démontrent que l'utilisation d'algorithme offre un bon rendement au système.

On peut donc conclure que le réordonnancement des pièces dans le cas d'indisponibilité des machines dans un système flexible augmente la performance du système par la diminution de la date effective de fin de la dernière tâche (makespan).

*-Annexe A-***Abréviations :**

- **FIFO:** First In First Out.
- **SPT :** Shortest Processing Time.
- **WSPT:** Weighted Shortest Processing Time
- **LPT :** Longest Processing Time).
- **EDD:** Earliest Due Date.
- **LWR :** Least Work Remaining.
- **MWR:** Most Work Remaining
- **MORNR:** Most OperatioNs Remaining
- **LRF:** Last Release time First
- **FMS:** Flexible Manufacturing System
- **ABC :** Activity-Based Costing
- **PSO :** Particle Swarm Optimization
- **TS:** Tabu Search
- **GRASP:** Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
- **VNPSO:** Variable Neighborhood Particle Swarm Optimization
- **MILP:** Mixed Integer Linear Programming
- **FCFS:** First Come First Served
- **CR:** Critical Ratio

## - Annexe B -

### Notations :

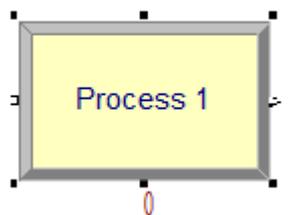
- $n$  : nombre totale de jobs
- $m$  : nombre totale de machines
- $n_i$  : nombre total d'opérations de job  $i$
- $O_{ij}$  : la  $j^{\text{ème}}$  opération du job  $i$
- $M_{ij}$  : l'ensemble de machines disponibles pour l'opération  $O_{ij}$
- $p_{ijk}$  : temps de traitement de  $O_{ij}$  sur la machine  $k$
- $t_{ijk}$  : temps de début de l'opération  $O_{ij}$  sur la machine  $k$
- $C_{ij}$  : temps de fin de l'opération  $O_{ij}$
- $i$  : indice des jobs  $i = 1, 2, \dots, n$
- $j$  : indice de la séquence d'opérations  $j = 1, 2, \dots, n_i$
- $k$  : indice de machine  $k = 1, 2, \dots, m$
- $s^0$  : la solution initiale
- $s^*$  : la meilleure solution actuelle,
- $f(x)$  : la fonction à minimiser,
- $f(s^*)$  : la valeur de la fonction à minimiser pour obtenir la meilleure solution,
- $T$  : la liste Tabou.
- $Tf_k$  : temps d'attente dans la machine  $k$
- $Tf_{k'}$  : temps d'attente dans la machine  $k'$
- $Tr_{kk'}$  : temps de transport à partir de machine  $k$  vers  $k'$
- $TPM_{k'}$  : temps de maintenance préventive dans la machine  $k$

## *- Annexe C -*

### Légende :



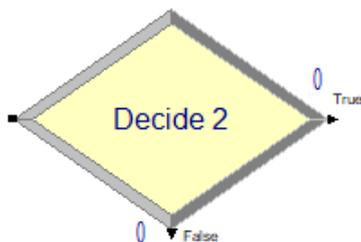
: Le point de départ des entités dans un modèle de simulation.



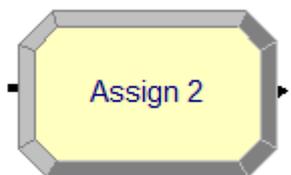
: Ce module est conçu comme la principale méthode de traitement dans la simulation.



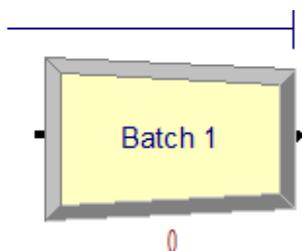
: Ce module est conçu comme le point final pour les entités d'un modèle de simulation.



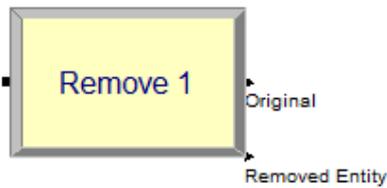
: Ce module permet les processus de prise de décision dans le système



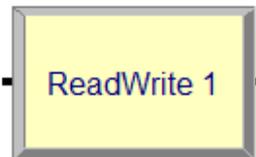
: Ce module est utilisé pour attribuer de nouvelles valeurs aux variables, aux attributs d'entité, aux types d'entité, aux images d'entité ou à d'autres variables du système.



: Ce module est destiné à servir de mécanisme de regroupement au sein du modèle de simulation.



: Le module de retrait retire une seule entité d'une position spécifiée dans une file d'attente et l'envoie à un module désigné.



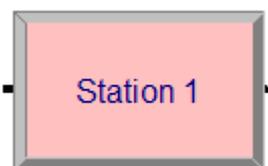
: Le module ReadWrite est utilisé pour lire des données à partir d'un fichier d'entrée ou du clavier et pour affecter les valeurs des données à une liste de variables ou d'attributs.



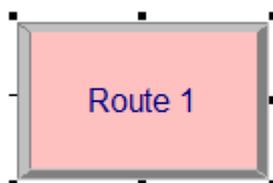
: Ce module est utilisé pour collecter des statistiques dans le modèle de simulation.



: Ce module maintient une entité dans une file d'attente pour attendre un signal.

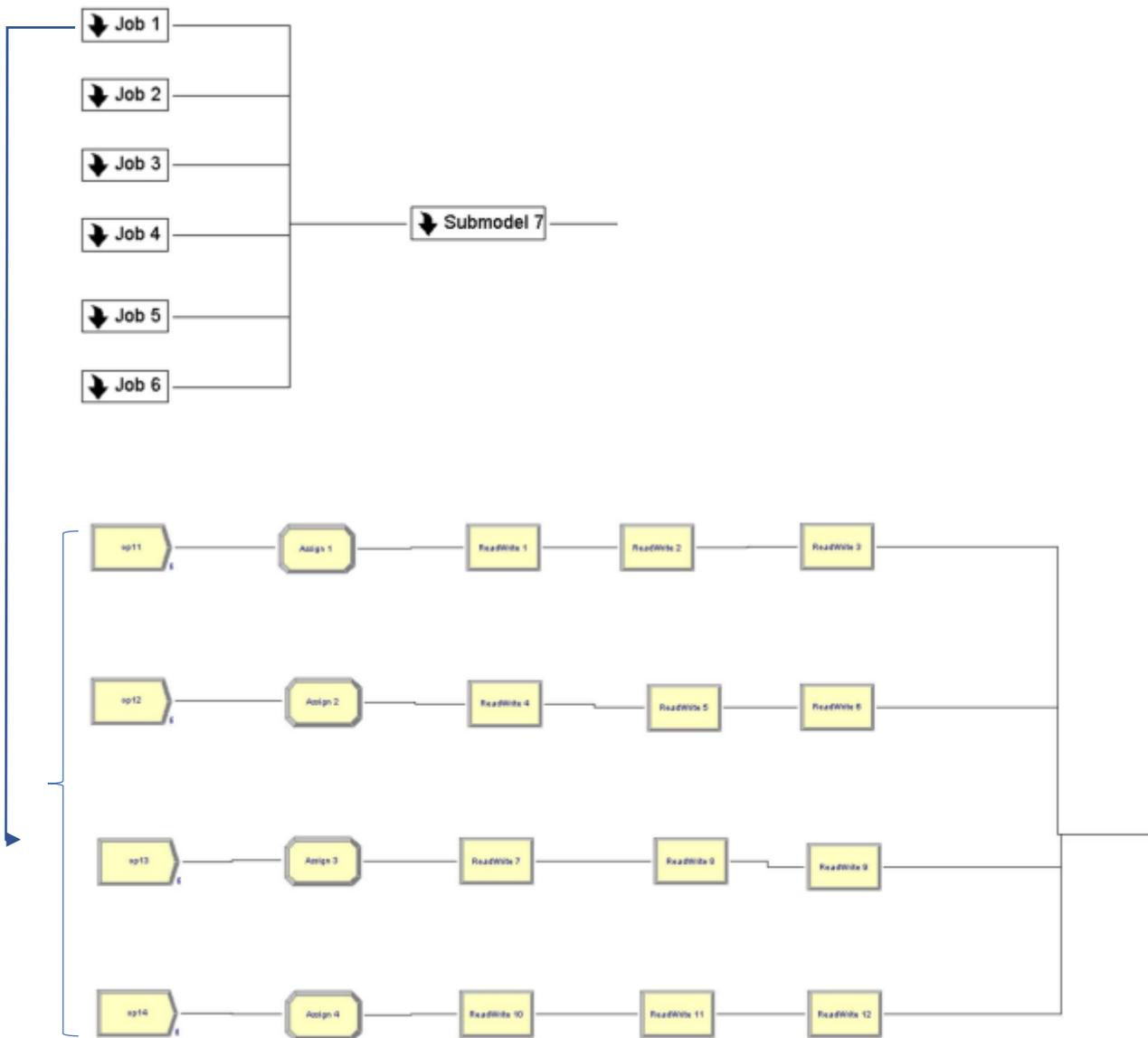


: Le module Station définit une station (ou un ensemble de stations) correspondant à un emplacement physique ou logique où le traitement a lieu.

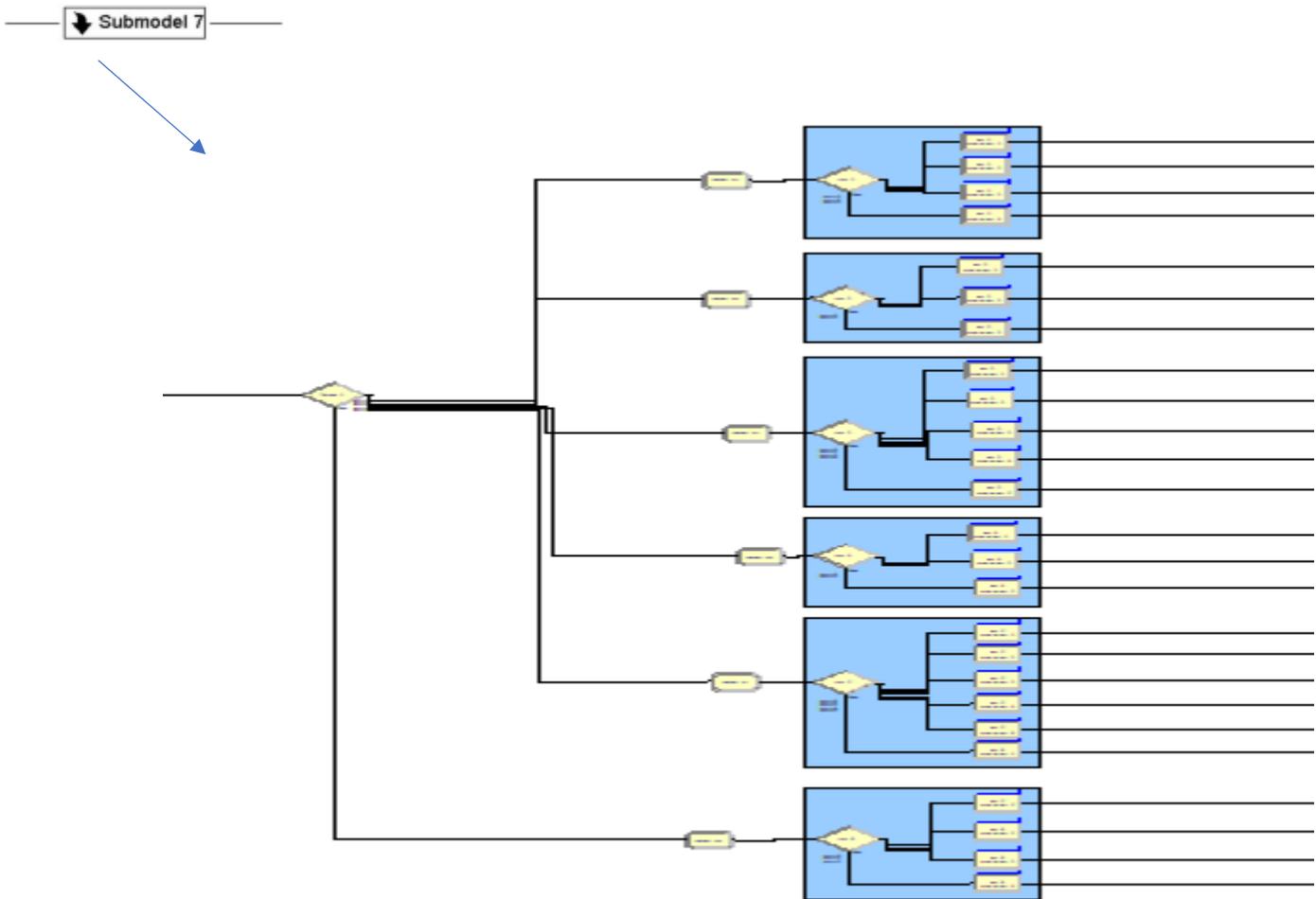


: Le module d'acheminement transfère une entité vers une station spécifiée, ou la station suivante dans la séquence de visite des stations définie pour l'entité. Un délai pour le transfert vers la station suivante peut être défini.

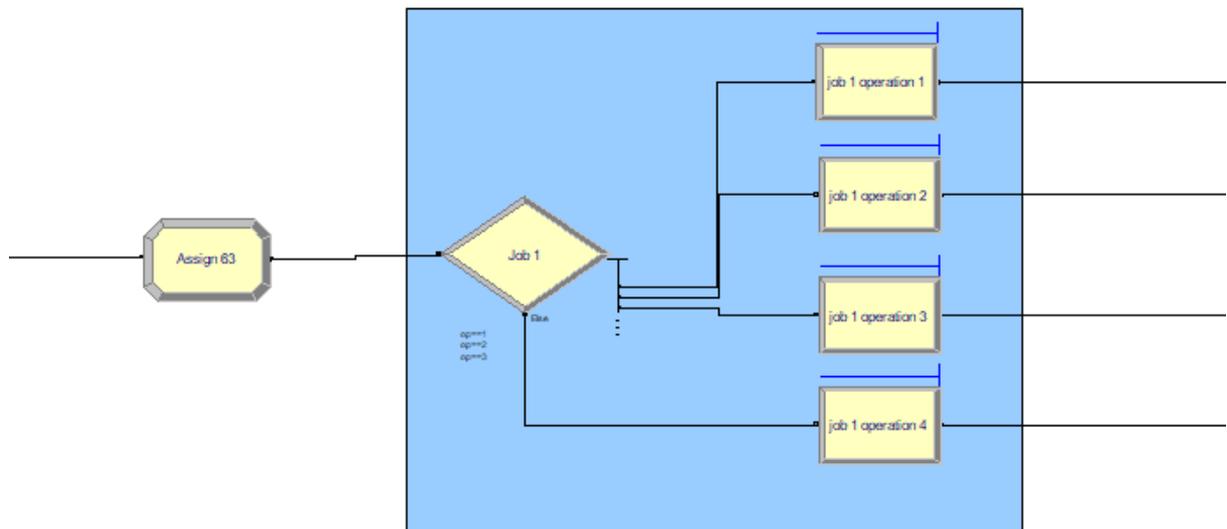
Figures :



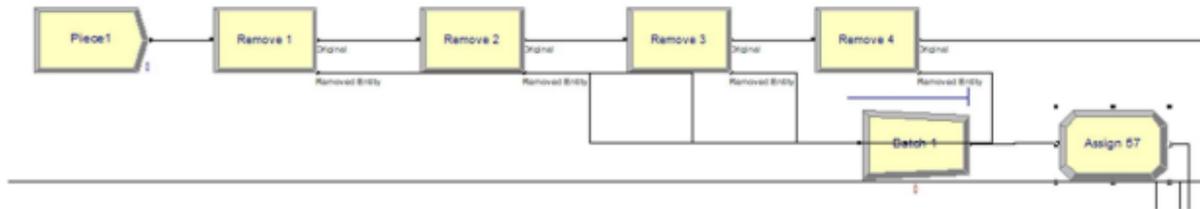
Présentation du job 1.



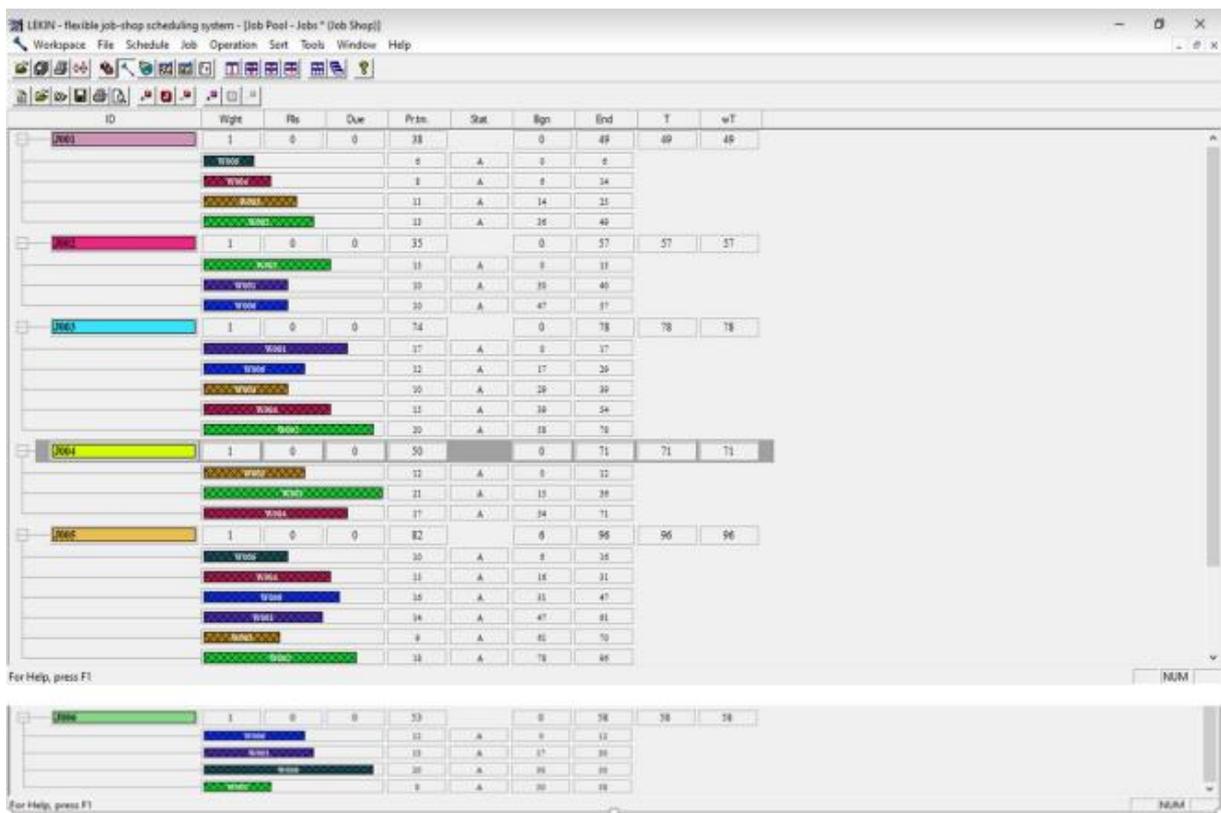
**Séparation des données pour chaque job**



**Exemple job 1 : Séparation des données**



Extraction des opérations de la file d'attente.



Représentation des jobs dans le logiciel Lekin

## Bibliographie

- [1] M. G. G. S. Gallego García, «industry 4.0 implications in production and maintenance management: An overview,» *procedia manufacturing*, vol. 41, pp. 415-422, 2019.
- [2] N. S. S. Anil kumar, Introduction to production and operation management, New age international publishers, 2008.
- [3] G. Javel, Organisation et gestion de la production, Paris: Dunod, 2010.
- [4] G. Halevi, Handbook of Production Management Methods., 2001.
- [5] k. hitomi, manufacturing systems scheduling, Taylor & Francis, 1996.
- [6] E. L. J. R. K. A. D. Lawler, Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity, vol. 4, Amsterdam: Centre for Mathematics and Computer Science., 1989, pp. 445-522.
- [7] H. Van Dyke Parunak, «Characterizing the Manufacturing Scheduling Problem,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 3, pp. 241-259, 1991.
- [8] T. P. D. Morton, Heuristic Scheduling Systems: With Applications to Production Systems and Project Management, 1993.
- [9] P. D. M. R. P. D. C. S. S. Z. Dr. Hans Corsten, Job-Shop-Scheduling Planung durch probabilistische lokale Suchverfahren, GABLER EDITION WISSENSCHAFT Information - Organisation - Produktion, 2002.
- [10] V. K. a. D. A. L. D. P. Eugene Levner, *Multiprocessor Scheduling Theory and Applications*, vol. 08, I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria, 2007, pp. 15-21.
- [11] R. L. R. R. G. Jose. M. Framinan, Manufacturing Scheduling Systems, London: springer, 2014.
- [12] F. R. Pierre Lopez, Production Scheduling, British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2008.
- [13] L. P. & E. P, L'ordonnancement, Economica: Paris, 1999.
- [14] H. Ahmed, *Développement et analyse de méthodes d'ordonnancement temps réel pour les systèmes flexibles de production, Thèse de Doctorat Es Sciences en Productique.*, 2012.
- [15] K. Z. BEN AHMED Razika, *Optimisation d'un problème d'ordonnancement de type job shop avec contrainte de transport*, 2017.
- [16] A. R. M. Ben-Daya, MANUFACTURING RESEARCH AND TECHNOLOGY 23 FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS:RECENT DEVELOPMENTS, ELSEVIER, 1995.
- [17] F. V. Yves Robert, Introduction to Scheduling, Taylor and Francis, 2010.
- [18] L. G. ,, K. P. ,, X. L. ,, H. L. Jin Xie, «Review on flexible job shop scheduling,» *the institution of*

*engineering and technology Collaborative Intelligent Manufacturing*, vol. 1, pp. 67-77, 2019.

- [19] S. B. Banu Çaliş, «A research survey: review of AI solution strategies of job shop scheduling problem,» *J Intell Manuf*, vol. 26, p. 961–973, 2015.
- [20] R. S. Peter Brucker, «job shop scheduling with multi-purpose machines,» *computing*, vol. 4, n° %145, pp. 369-375, 1990.
- [21] P. Bradimarte, «Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search,» *Annals of operations research*, vol. 3, n° %141, pp. 157-183, 1993.
- [22] B. J. M. T. Johann Hurink, «Tabu search for job-shop scheduling problem with multi-purpose machines,» *Operations-Research-Spektrum*, vol. 4, n° %115, pp. 205-215, 1994.
- [23] L. M. G. monaldo Masteollili, «Effective neighbourhood functions for flexile job shop problem,» *journal of Scheduling*, vol. 1, n° %13, pp. 3-20, 2000.
- [24] K. P. J. K. Yeo Keun Kim, «A symbiotic evolutionary algorithm for the integration of process planning and job shop scheduling,» *Computers & Operations research*, vol. 8, n° %130, pp. 1151-1171, 2003.
- [25] T. W. L. C. F.T.S. Chan, «Flexible job-shop scheduling under resource constraints,» *International Journal of Production Research*, vol. 11, n° %144, pp. 2071-2089, 2006.
- [26] G. M. G. C. F. Pezzella, «A genetic algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem,» *Computers & Operations Research*, vol. 10, n° %135, p. 3202 – 3212, 2008.
- [27] J. G. L. L. Mitsuo Gen, «multiusage-ased Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling Problem,» *Intelligent and Evolutionary Systems*, vol. 187, pp. 183-196, 2009.
- [28] F. P. L. De Giovanni, «An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-Shop Scheduling problem,» *European Journal of Operational Research*, vol. 2, n° %1200, pp. 395-408, 2010.
- [29] X. S. P. L. L. G. Guohui Zhang, «An effective hybrid particle swarm optemization algorithm for multi-objective scheduling problem,» *Comput. Ind. Eng*, vol. 4, n° %156, pp. 1309-1318, 2009.
- [30] A. A. O. C. S. H. M. Hongbo Lui, «Variable neighborhood praticle swarm optimization for multi objective flexible job shop scheduling problems,» *Asia-Pacific Conference on Simulited Evolution and learning*, pp. 197-204, 2006.
- [31] B. N. Ahmed Azab, «Greed Heuristics for Distributed Job Shop Problems,» *pricedia CIRP*, vol. 20, pp. 7-12, 2014.
- [32] M. B. e. L. J., «A new classification Scheme For Flexible Manufacturing Systems,» *International Journal of Production*, vol. 31, pp. 299-309, 1993.
- [33] R. G. H. Joseph Talavage, *Flexible manufacturing systems in practice Applications , Design and Simulation*, a. & F. Group, Éd., 1988.
- [34] M. B. V. K. H.K. Shivanand, *Flexible manufacturing system*, New Age International , 2006.

- [35] I. E. B. A. J. Rim Zarrouk, «A two-level particle swarm optimization algorithm,» *Swarm Intelligence*, vol. 13, pp. 145-168, 2019.
- [36] L. S. M. G. Jie Gaoa, «A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for,» *Computers & Operations Research*, vol. 35, p. 2892 – 2907, 2008.
- [37] M. L. Pinedo, «Scheduling Theory, Algorithms, and Systems,» 2016.
- [38] J. Paulli, «A hierarchical approach for the FMS scheduling problem,» *European Journal of Operational Research*, vol. 86, pp. 35-42, 1995.
- [39] J. D. D. R. K. S. S. a. Browne, «Classification of flexible manufacturing,» *The FMS Magazine*, vol. 22, pp. 114-117, 1984.
- [40] S. H. P. B. Imed Kacem, «Approach by Localization and Multiobjective Evolutionary Optimization for Flexible Job-Shop Scheduling Problems,» *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, vol. 32, pp. 1-13, 2002.
- [41] A. A. & H. E. V. Roshanaei, «Mathematical modelling and a meta-heuristic for flexible job shop scheduling,» *International Journal of Production Research*, pp. 6247-6274, 2013.
- [42] v. Kaplanoglu, «An object-oriented approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem,» *Expert Systems With Applications* , vol. 45, pp. 71-84, 2016.

## **Résumé :**

Pendant des décennies, l'ordonnancement a été un vaste domaine de recherche, et plusieurs travaux ont été faits pour exprimer, classer et résoudre les problèmes d'ordonnancement. La plupart de ces problèmes sont difficiles à gérer du point de vue informatique et nécessitent des algorithmes complexes.

Dans notre projet, Nous présentons une étude du problème d'ordonnancement sur des machines ayant des durées d'indisponibilité. Le but ici est la diminution du makespan. Dans la première section nous proposons un système d'ordonnancement de type job shop flexible contient 6 machines et 6 types de pièce à produire. Nous avons modélisé et simulé ce système sous le logiciel ARENA. Dans la deuxième section, nous avons présenté notre algorithme proposé pour résoudre le problème d'indisponibilité de machines. Ensuite nous faisons une comparaison entre les résultats obtenus par simulation. Enfin, une analyse de la méthode proposée pour évaluer son efficacité a été présentée.

**Mots clés : Ordonnancement, Job Shop flexible, Maintenance, makespan, indisponibilité des machines.**

## **Abstract:**

For decades, scheduling has been a broad area of research, and much work has been done to express, classify and solve scheduling problems. Most of these problems are computationally difficult and require complex algorithms.

In our project, we present a study of the scheduling problem on machines with downtime. The goal here is to reduce the makespan. In the first section, we propose a flexible job shop scheduling system with 6 machines and 6 types of parts to produce. We have modeled and simulated this system under the ARENA software. In the second section, we presented our proposed algorithm to solve the problem of unavailability of machines. Then we make a comparison between the results obtained by simulation. Finally, an analysis of the proposed method to evaluate its effectiveness has been presented.

**Keywords: Scheduling, Flexible Job Shop, Maintenance, makespan, unavailability of the machines.**

## **ملخص**

على مدى عقود، كانت الجدولة مجالاً واسعاً للبحث، وتم القيام بالكثير من العمل للتعبير عن مشاكل الجدولة وتصنيفها وحلها. معظم هذه المشاكل من الصعب التعامل معها من منظور الكمبيوتر وتتطلب خوارزميات معقدة.

في مشروعنا، نقدم دراسة لمشكلة الجدولة على الآلات مع التوقف. الهدف هنا هو انخفاض الوقت اللازم لإنجاز العمل.

في القسم الأول، نقترح نظام مرناً لجدولة ورش العمل يحتوي على 6 آلات و 6 أنواع من الأجزاء التي سيتم إنتاجها ونقوم بنمذجتها ومحاكاتها في إطار برنامج

في القسم الثاني، نقترح كيفية حل مشكلة عدم توفر الجهاز باستخدام الخوارزمية المقترحة. ثم نقوم بإجراء مقارنة بين نتائج النمذجة والمحاكاة. وأخيراً، يعرض تحليل للطريقة المقترحة لتقييم فعاليتها

**الكلمات الرئيسية: الجدولة، متجر الوظائف المرنة، الصيانة، عدم توافر الجهاز، المدة الإجمالية للجدولة**