

# *Table des matières*

<b>Table des matières</b> .....	5
<b>Liste des figures</b> .....	8
<b>Liste des tableaux</b> .....	9
<b>Liste des algorithmes</b> .....	10
<b>Introduction Générale</b> .....	12
<b>Chapitre 1 : L’ordonnancement dans les systèmes de production</b>	
<b>Introduction</b> .....	16
<b>Généralités sur les systèmes de production</b> .....	17
Production .....	17
Un processus de production .....	17
Un système de production .....	17
<b>Classification des systèmes de production</b> .....	18
Classification selon les processus de production .....	18
Classification selon le mode de déclenchement de la production .....	18
Classification selon l'organisation des ressources .....	19
<b>Modèle conceptuel d'un système de production</b> .....	20
Les différents types de décisions.....	21
Les décisions stratégiques .....	21
Les décisions tactiques .....	21
Les décisions opérationnelles .....	21
Organisation de la production .....	22
Critères d'évaluation d'un système de production .....	23
<b>Généralités sur l’ordonnancement dans les systèmes de production</b> .....	24
Présentation des problèmes d’ordonnancement .....	24
Formulation d’un problème d’ordonnancement .....	24
Caractéristiques générales des ordonnancements .....	27
Problèmes d’ordonnancement d’ateliers .....	27
Représentation d’un ordonnancement .....	30
Complexité des problèmes d'ordonnancement .....	30

Méthodes de résolution .....	31
<b>Conclusion .....</b>	<b>34</b>
 <b>Chapitre 2 : La maintenance des systèmes de production</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>36</b>
<b>La maintenance .....</b>	<b>37</b>
Evolution de la maintenance .....	38
Objectifs de la maintenance .....	39
Classification des méthodes de maintenance .....	40
Maintenance corrective .....	40
Maintenance préventive.....	40
Processus maintenance .....	42
Les niveaux de maintenance .....	44
La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur .....	44
<b>L’Ordonnement de la maintenance .....</b>	<b>45</b>
Les niveaux hiérarchiques .....	45
Les objectifs de l’ordonnement de la maintenance .....	46
<b>Conclusion .....</b>	<b>48</b>
 <b>Chapitre 3 : Ordonnement conjoint production / maintenance</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>50</b>
<b>Problématique .....</b>	<b>51</b>
<b>La politique d’ordonnement conjoint Production / Maintenance .....</b>	<b>53</b>
Ordonnement séparé .....	53
Ordonnement séquentiel .....	53
Ordonnement intégré .....	54
<b>Etat de l’art .....</b>	<b>54</b>
<b>Le Système MPS500.....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>58</b>
 <b>Chapitre 4 : Optimisation par les algorithmes génétiques</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>60</b>
<b>Problème d’atelier de type flow shop .....</b>	<b>61</b>

Notations et Hypothèses .....	61
La fonction objective .....	62
Méthode de résolution .....	63
Les algorithmes génétiques .....	63
Codage des solutions .....	66
Génération de la population initiale .....	67
L'opérateur de sélection .....	68
L'opérateur de croisement .....	69
L'opérateur de mutation .....	71
Test et validation .....	71
L'application sur MPS500 .....	75
<b>Conclusion</b> .....	76
<b>Conclusion Générale</b> .....	78
<b>Perspectives</b> .....	79
<b>Références</b> .....	81

# *Liste des figures*

1.1	Classification des systèmes de production.....	18
1.2	Modèle conceptuel d'un système de production .....	20
1.3	Organisation hiérarchique d'un système de gestion de production .....	22
1.4	Représentation d'un atelier Flow Shop.....	28
1.5	Représentation d'un atelier Job Shop .....	28
1.6	Exemple d'un diagramme de Gantt .....	30
2.1	Le contenu de la fonction maintenance .....	37
2.2	Phase d'évolution de la fonction maintenance .....	39
2.3	Structure de la maintenance conditionnelle .....	41
2.4	Les types de la maintenance .....	42
2.5	L'ordonnancement de la maintenance .....	43
2.6	Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance ....	47
3.1	Ordonnancement de la production .....	52
3.2	Planification de la maintenance .....	52
3.3	Conflits entre Maintenance et Production dans un ordonnancement séparé .....	52
3.4	Ordonnancement Séquentiel .....	53
3.5	Ordonnancement Intégré .....	54
3.6	La station « distribution + test » de MPS500.....	56
3.7	La station « prélèvement + traitement » de MPS500.....	56
3.8	La station « contrôle » de MPS500.....	56
3.9	La station « montage + robot » de MPS500 .....	57
3.10	La station « livraison » de MPS500.....	57
4.1	Les temps de traitement des 20 taches dans 20 machines .....	74
4.2	L'interface du programme .....	76

# *Liste des tableaux*

1.1	Temps opératoires pour l'exemple d'un flow-shop .....	30
3.1	Classification des articles de maintenance préventive en fonction du type de problème d'ordonnement .....	55
4.1	Notations utilisées .....	62
4.2	Les résultats sans maintenance .....	73
4.3	Les résultats avec la maintenance .....	73
4.4	Les meilleurs dix résultats .....	74
4.5	Temps opératoires des tâches de production et de maintenance .....	75

# *Liste des algorithmes*

4.1	Algorithme génétique en générale .....	65
4.2	L'algorithme génétique pour le cas étudié .....	66
4.3	Algorithme de Procédure de génération .....	67
4.4	Algorithme de Procédure de sélection .....	68
4.5	Algorithme de Procédure de croisement .....	70
4.6	Algorithme de Procédure de mutation .....	71

# **Introduction Générale**

Rapport Gratuit.com

# *Introduction générale*

Dans le domaine de la production industrielle, les tendances actuelles indiquent que les systèmes manufacturiers performants doivent s'adapter rapidement aux fluctuations du marché (demandes aléatoires) et aux perturbations internes (pannes des machines). Les machines doivent pouvoir fabriquer plusieurs types de produits simultanément et de manière efficace.

Dans un tel contexte, la planification optimale de la production et le contrôle en temps réel de ces machines deviennent de plus en plus préoccupants tant pour les investisseurs et producteurs que pour les consommateurs. Dans ces conditions, la détermination d'un rythme de production, d'une politique de maintenance des machines, et d'une règle d'ordonnancement et d'affectation des produits aux machines qui permet de minimiser les coûts d'exploitation de ces systèmes est de nos jours un problème préoccupant dans le domaine de l'optimisation des systèmes de production.

Les activités de production et de maintenance apparaissent à priori comme totalement antagonistes et par là même incompatibles puisqu'elles agissent sur les mêmes ressources. Ces deux activités ne peuvent donc pas être accomplies au même moment sur un même système, ce qui laisse augurer bien des conflits dans l'utilisation du système par l'un ou l'autre des services liés à la maintenance ou à la production. Ce type de conflit entraîne naturellement des querelles qui nuisent à la productivité globale de l'entreprise. Malgré l'interdépendance qui existe entre les deux services, ces deux activités sont généralement planifiées séparément, leur intégration dans le fonctionnement de l'atelier pose un problème qui est souvent résolu par négociation entre les responsables respectifs des deux services et de manière séquentielle. Les besoins de la production sont donc quelque peu antagonistes. Pour satisfaire dans les délais les clients, il doit utiliser de façon optimale l'ensemble des installations, mais il doit également prévoir les interventions de maintenance dans le planning de production [Benbouzid F,2005].



Notre travail s'inscrit dans ce souci d'optimiser l'ordonnancement de production et de maintenance en anticipant tout conflit pouvant se présenter entre ces deux services et ceci peut être réalisé en créant une certaine coopération entre les deux services production et maintenance. Dans le cadre de l'étude théorique de ce mémoire, nous nous focalisons sur l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance dans le cas d'atelier de type Flow Shop de permutation, et nous nous intéressons à la maintenance préventive systématique.

Le but de ce travail est de proposer une modélisation et une approche de résolution intégrée au problème. En effet, les services de production et de maintenance doivent collaborer pour atteindre un but commun, celui de la maximisation de la productivité du système de production. Par conséquent, les objectifs de production et de maintenance doivent être considérés avec le même niveau d'importance. Donc, les solutions au problème conjoint production-maintenance doivent être des solutions de compromis entre les objectifs des deux services. En outre, le but final des décideurs est d'avoir un système de production qui soit le plus disponible possible lui permettant de réaliser les tâches de production le plus tôt possible. Des modèles de fiabilité ont été utilisés pour prendre en considération l'aspect maintenance [Berrichi A,2009].

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit:

**Le premier chapitre** sera présenté en deux parties. La première partie abordera succinctement les systèmes de production à travers la définition de ce qu'est le système de production manufacturier au sein de l'entreprise. La deuxième partie sera consacrée à l'ordonnancement dans les systèmes de production, où nous y présenterons les problèmes d'ordonnancement de production, leur typologie et leur difficulté.

**Le deuxième chapitre** sera consacré à la maintenance des systèmes de production, où nous y présenterons les concepts de la maintenance liés à la sûreté de fonctionnement et l'ordonnancement des interventions de maintenance préventives systématiques.

**Le troisième chapitre** s'intéresse à la nécessité de la mise en œuvre d'une relation de coopération entre les services de production et de maintenance. Nous présenterons en premier lieu notre problématique. Ensuite, nous rappellerons les différentes politiques d'ordonnancement conjoint de la

production et de la maintenance recensées de la littérature. Un état de l'art sur ces travaux sera présenté. Par la suite, nous présenterons le système MPS500 où nous allons appliquer notre méthode pour la solution conjointe du problème d'ordonnancement de la production et de la maintenance dans le cas du Flow Shop.

**Dans le quatrième chapitre,** une résolution du problème à l'aide des algorithmes génétiques sera présentée. Une description complète du fonctionnement des algorithmes génétiques sera faite. Nous présenterons une mise en œuvre d'une algorithmes génétiques pour l'ordonnancement conjoint production et maintenance dans un Flow Shop, nous terminons par une série de tests pour évaluer la méthode de résolution proposée, et l'application de cette méthode sur le système MPS500.

Le rapport se termine par des conclusions ainsi que des perspectives de recherche envisagées.

# **Chapitre I**

**L'ordonnancement dans les  
systèmes de production**

## **Introduction**

La théorie de l'ordonnancement est une branche de la recherche opérationnelle et de la gestion de production qui vise à améliorer l'efficacité d'une entreprise en termes de coûts de production et de délais de livraison. Le problème d'ordonnancement consiste à organiser, dans le temps, la réalisation des tâches compte tenu des contraintes de temps et de ressources, afin d'optimiser un ou plusieurs objectifs. Des modèles mathématiques et des méthodes de résolution sont conçus pour résoudre les problèmes posés. L'intérêt porté à cette thématique est largement motivé par l'apparition de ces problèmes dans des domaines aussi variés que nombreux, notamment le secteur industriel et celui de l'informatique. Parmi les nombreux ouvrages de référence qui ont été publiés, on trouve Rinnooy Kan [Rinnooy K, 1976], Carlier et Chrétienne [Carlier J, 1988], Esquirol et Lopez [Esquirol P, 1999].

Ce chapitre se présentera en deux parties : nous présenterons, dans la première partie, quelques notions de base concernant les systèmes de production problèmes d'ordonnancement dans les ateliers de production, et nous nous intéresserons dans la deuxième partie aux problèmes d'ordonnancement dans les ateliers de production et les méthodes de résolutions.

## **I L'ordonnancement dans les systèmes de production:**

### **1.1 Généralités sur les systèmes de production**

#### **I.1.1 Production**

La fonction production est l'opération de transformation de matières premières ou de composants en produits qui ont une valeur sur le marché. Conformément au processus de fabrication établi par la fonction « méthode ».

Les activités de production peuvent prendre différentes formes ne permettant pas de généraliser facilement cette fonction [Georges Javel, 2007]. La production peut :

- Etre continue ou discontinue ;
- Etre unitaire, par lot ou de masse ;
- Concerner des fabrication à la commande, pour stockage ou mixte.

Il est également possible, au stade de la fabrication, de différencier les fabrications par leur finalité (usinage, assemblage, usinage-assemblage).

Giard définit la production comme étant une transformation de ressources appartenant à un système productif et conduisant à la création de biens et de services.

Les ressources peuvent être de quatre types [Giard V, 1988]:

- des équipements (machines, ...) ;
- des hommes (opérateurs, ...) ;
- des matières (matières premières et composants) ;
- des informations techniques ou procédurales (gammes, fiches opératoires, ...).

#### **I.1.2 Un processus de production :**

IL est généralement composé d'un grand nombre d'opérations ou de transformations organisées en réseau. Ces opérations assurent des transformations de forme (modification des produits eux même), des transformations dans le temps (fonction de stockage) ou dans l'espace (fonction de transport).

#### **I.1.3 Un système de production :**

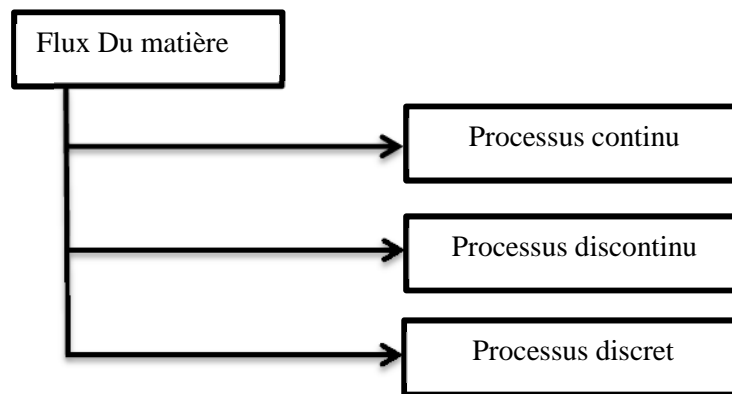
Un système de production est généralement vu comme l'association d'un ensemble de ressources en interaction pour réaliser une activité de production. En effet, la production s'effectue par une succession d'opérations dites de transformation, de transfert, d'assemblage et de désassemblage en exploitant les ressources disponibles (machines, moyens de transfert,...) afin de transformer les matières premières (composants entrant dans le système) en produits finis sortant de ce système [Letouzey, 2001].

## I.2 Classification des systèmes de production

### I.2.1 Classification selon les processus de production

De manière générale, nous pouvons classer les systèmes de production en trois grandes classes :

- **Les processus continus** tels que la production électrique, la chimie ou la papeterie;
- **Les processus discrets** tels que l'usinage et toutes les activités d'assemblage, etc...
- **Les processus discontinus** qui se situent par définition à mi-chemin entre les processus continus et les processus discrets. Les deux types de processus sont couplés: la production est continue mais il y a un conditionnement discret des produits.



**Figure 1.1** Classification des systèmes de production

Face à la diversité des processus de production, une classification s'impose. Giard propose deux typologies : une première liée à l'origine de la demande et une seconde liée aux ressources [Giard V, 1988].

### I.2.2 Classification selon le mode de déclenchement de la production

Cette classification, proposée par Giard [Giard V, 1988]. Les ordres de fabrication peuvent émaner, soit pour satisfaire des commandes sur mesure, soit pour mettre à niveau les stocks des produits finis. Pour cette catégorie, les systèmes de production peuvent être regroupés en trois classes :

- **Systèmes de production à la commande:** la production est déclenchée soit par les commandes fermes des clients soit par des demandes aléatoires. Autrement dit, la fonction de production est pilotée par l'aval. L'objectif est de satisfaire les délais de livraison négociés avec le client. L'avantage de ces systèmes est l'inexistence de produits en stock.

- **Systèmes basés sur la production pour stock:** la fonction de production est pilotée par l'amont, c'est-à-dire que le processus de production répond à un cahier des charges prédéfini ce qui peut se traduire par la constitution de stocks de produits finis. Contrairement à la production sur commande, les délais de livraison sont nuls mais il y a des stocks à gérer.
- **Production par programme :** Elle se base sur des commandes assurées et des Prévisions de vente pour déterminer un programme de production.

### I.2.3 Classification selon l'organisation des ressources

Cette typologie dépend de la manière dont les ressources sont organisées pour traiter les matières premières ou les produits semi finis. Elle est divisée en quatre types de systèmes de production [Aliouat W,2013]:

- **Système à production unitaire:** ce type de système concerne les grands projets (uniques ou réalisés à de petites séries) nécessitant des périodes de temps assez longues et des moyens relativement importants. La réalisation du produit se fait sur mesure en fonction de la demande du client (bâtiment, construction navale, etc.). Pour ce type d'organisation, l'objectif est de réaliser le projet dans un délai optimal. Pour cela, la tâche principale de l'entreprise est de planifier les différentes opérations composant le projet en respectant des contraintes temporelles et de succession entre les opérations. Les méthodes de modélisation les plus répandues sont le diagramme de Gantt, les méthodes des potentiels et la méthode PERT.
- **Système de production en petite ou moyenne série ou atelier:** ce type de production est rencontré dans l'industrie manufacturière où il faut fabriquer une grande variété de produits en faible quantité en utilisant les mêmes moyens de production. Les ateliers sont classés selon l'ordre de passage sur les machines des différents produits à fabriquer (gamme de fabrication). On distingue les ateliers à cheminement unique (flowshop) où toutes les gammes de fabrication sont identiques, les ateliers à cheminements multiples où chaque produit ou famille de produits est réalisé selon une gamme spécifique (jobshop) et les ateliers à cheminements multiples et libres (openshop) où le produit ne possède pas une gamme spécifique.
- **Système de production en grande série ou masse:** ce type de production est adopté quand il s'agit de fabriquer des produits standards à grande consommation (moteurs, composants industriels, etc.). Ces systèmes sont organisés en ligne de fabrication où les produits passent par une même séquence de postes de travail.
- **Système de production continue ou processus:** dans ce système de production peu de produits sont fabriqués mais en grande quantité. La production est déclenchée par l'amont tel que l'industrie des boissons ou de l'acier. Dans ce type d'organisation le niveau de stock d'en-cours est quasiment nul.

### I.3 Modèle conceptuel d'un système de production

Les systèmes de production peuvent être des systèmes très complexes et difficiles à gérer au vu de toutes leurs composantes fonctionnelles (fabrication, achat, distribution, maintenance...). Ils sont donc beaucoup étudiés, et ce depuis longtemps. Plusieurs approches ont été envisagées dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement et de mieux les appréhender.

Il est possible de décomposer les systèmes de production en trois sous-systèmes [AliouatW,2013]: **Le système physique** de production, **le système d'information** et **le système de décision** (Figure 1.2). Le système couramment appelé **système de gestion de production** est constitué par la partie du système de décision et du système d'information traitant des fonctions rattachées directement à la production (par exemple, les achats, les approvisionnements, la planification, la gestion des ressources, la maintenance, etc.).

En termes de système, **le système physique** transforme les matières premières en produits finis. Pour effectuer cette transformation, il est commandé par **le système de gestion** qui transforme les informations à caractère commercial en ordres de fabrication et ordres d'approvisionnements. Le système est bouclé puisqu'en retour, il reçoit les informations de suivi du système physique pour pouvoir effectivement piloter ce dernier.

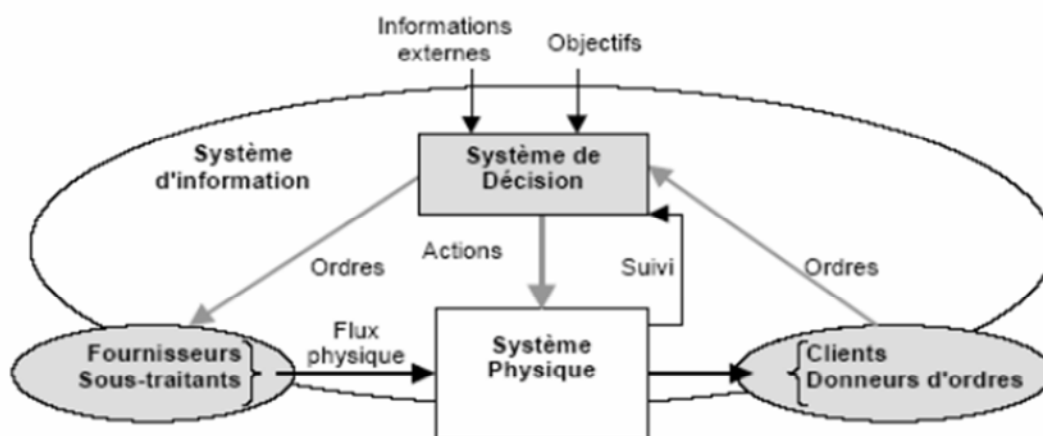


Figure 1.2 Modèle conceptuel d'un système de production

En termes de flux, un ensemble de flux régulés parcourent le système de production. Tout d'abord, **le flux physique** ou **de matière** qui transforme la matière première et les composants en produits finis, puis **le flux d'information** ou **de suivi** qui permet la circulation des informations nécessaires au contrôle et à la prise de décision. Enfin, **le flux de décision** ou ordre qui contrôle et pilote le système physique. Le système de gestion est composé de différentes activités telles que [Benbouzid F, 2005] :



- L'élaboration du Plan Directeur de Production (PDP);
- Le calcul des besoins bruts, nets et d'approvisionnements ;
- La gestion des stocks ;
- Les achats ;
- L'élaboration du plan de charge ;
- **L'ordonnancement ;**
- Et enfin le lancement.

### **I.3.1 Les différents types de décisions:**

Les décideurs sont confrontés à des situations difficiles qui surgissent du secteur industriel et environnement de production où plusieurs décisions doivent être prises chaque jour et aucune d'entre elles n'est identique à une autre, chacune a une incidence différente sur le fonctionnement, la rentabilité, la performance, l'activité, l'évolution et parfois même la survie de l'entreprise. De ce fait, plusieurs types de décisions se situant à différents niveaux hiérarchiques ont été mis en place, dans ce qui suit, nous allons décrire les trois plus grandes architectures décisionnelles : stratégique, tactique et opérationnel, correspondant respectivement à des horizons à long, moyen et court terme [Belkaid F, 2014].

#### **I.3.1.1 Les décisions stratégiques**

Ce niveau représente les orientations à long terme, il concerne la partie conception de l'entreprise. Ces décisions partent de la nature et la répartition judicieuse des ressources en vue de commercialiser des produits et de conquérir des marchés selon la combinaison qui donnera le meilleur résultat au regard des critères ou objectifs retenus. Elles ont un impact global dans la mesure où elles remettent en question l'existant au niveau de toutes les fonctions de l'entreprise. Les enjeux et les dimensions sont tellement importants qu'ils constituent en soit un véritable phénomène d'inertie. Elles sont prises dans le cadre par exemple d'ouverture ou de fermeture de certains sites de production ou leur délocalisation, d'affectation d'une nouvelle zone de marché à un centre de distribution, le développement d'un nouveau produit, la configuration d'usine, de mode de fonctionnement, etc.

#### **I.3.1.2 Les décisions tactiques**

Ces décisions représentées par les orientations à moyen terme s'inscrivent dans le cadre logique dessiné par les décisions stratégiques, elles regroupent tout ce qui est ressource physique et informationnelle nécessaires à la production. Les décisions tactiques s'intéressent à l'aspect planification de la production, l'affectation des clients aux centres de distribution, le choix de la politique de gestion des stocks, etc.

#### **I.3.1.3 Les décisions opérationnelles**

Ce sont généralement des décisions journalières, car elles ont une portée plus limitée dans le temps. Ce niveau représente les orientations à court terme. Cette catégorie vise à obtenir et à analyser sur son aspect technique, le maximum de

rentabilité. L'impact opérationnel est limité sur le plan spatial au niveau de l'entreprise, il concerne bien souvent une fonction interne de l'entreprise. Les décisions opérationnelles assurent la flexibilité quotidienne pour faire face aux fluctuations prévues de la demande et la disponibilité des ressources et réagir aux aléas. Elles sont prises, dans le cas par exemple, de la gestion de stocks, de l'**ordonnancement** de la production, etc.

La Figure 1.3 décrit cette hiérarchie et montre l'interaction qui existe entre les activités du système de gestion.

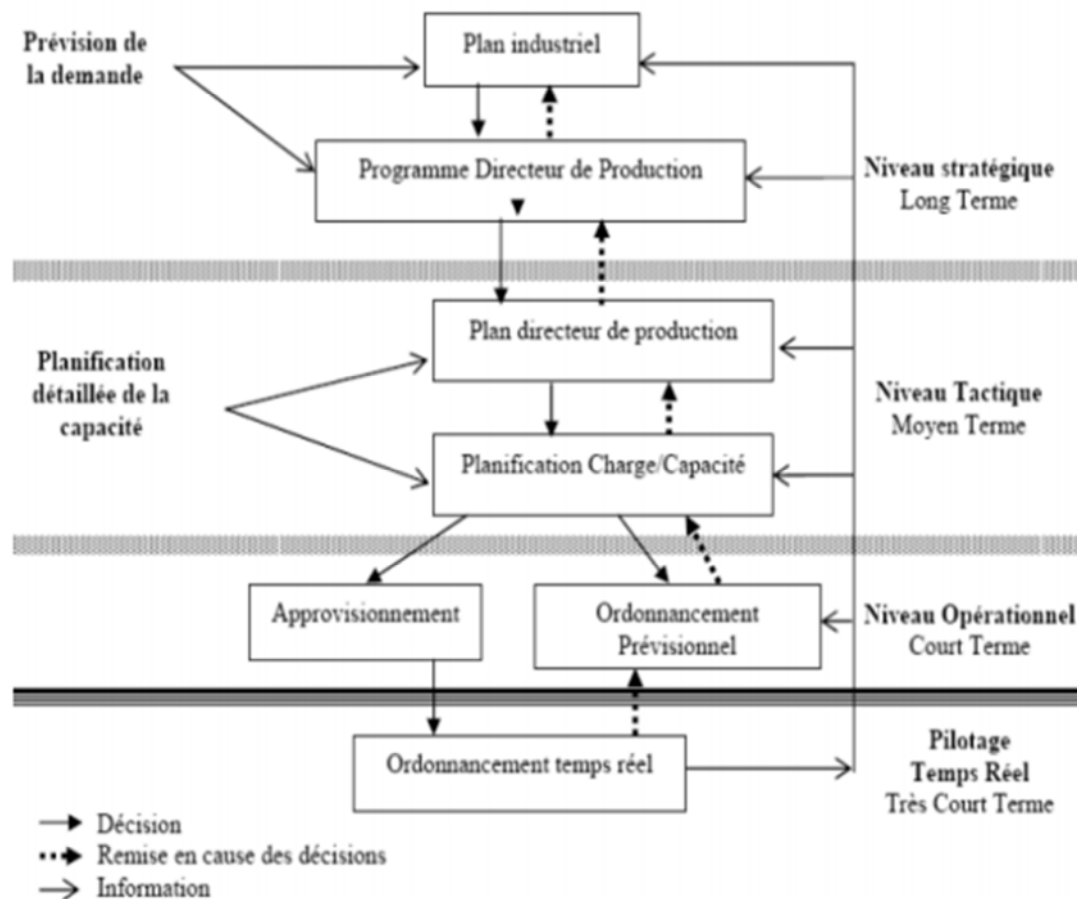


Figure 1.3 Organisation hiérarchique d'un système de gestion de production

### I.3.2 Organisation de la production :

L'organisation de la production est passée par plusieurs étapes en fonction des tendances de marché qui caractérisaient l'environnement économique. Les nouvelles formes d'organisation du travail inspirées du Toyotisme (développé par les responsables de production de la firme japonaise Toyota en 1950) s'inscrivent dans une logique de qualité totale qui consiste à développer un processus continu d'amélioration du processus de production à partir de la mobilisation de l'ensemble des personnels impliqués que ce soit au niveau des méthodes de gestion de la qualité que de l'assurance-qualité [GM, 2005]. Cette recherche de qualité totale est symbolisée par le principe des « 5 zéros » [Berrichi A, 2009]:

**Zéro défaut :** le processus de fabrication doit limiter au maximum les défauts de fabrication de manière à éviter le gaspillage des ressources utilisées pour produire. Le contrôle de la qualité du processus productif ne se limite donc plus à un contrôle à la fin du processus productif mais est intégré dans l'ensemble de la chaîne de production.

**Zéro panne :** la recherche d'une efficacité optimale du processus productif (afin de garantir des gains de productivité) se traduit par la mise en place d'un système de maintenance préventif qui vise à éviter les pannes plutôt qu'à intervenir une fois celles-ci constatées (ce qui entraîne alors un arrêt temporaire de la production).

**Zéro délai :** les gains de productivité vont par ailleurs être obtenus par la mise en place d'un système de production en continu ce qui dans le cadre d'un mode de production flexible se traduit par l'élaboration de processus de production facilement reprogrammables et adaptables.

**Zéro stocks :** des gains de productivité peuvent aussi être obtenus par la suppression des stocks de produits finis ou de produits intermédiaires qui coûtent chers à l'entreprise. La production va donc être organisée selon le principe de la production au « juste-à-temps ».

**Zéro papier :** la flexibilité de l'outil de production ne pourra être obtenu que par une organisation plus souple et donc moins dépendante de procédures administratives complexes qui ralentissent le processus de décision. Le système d'information devient donc moins formel et moins vertical.

### I.3.3 Critères d'évaluation d'un système de production

La conception et l'exploitation des systèmes de production nécessitent des techniques d'évaluation basées sur deux principaux critères: la performance et la sûreté de fonctionnement [Benbouzid F, 2005] :

#### I.3.3.1 La performance

La performance d'un système peut être définie comme étant l'efficacité à fournir un service attendu à un instant donné et dans des conditions prédéterminées. Elle intègre les notions de coût, délais, qualité, flexibilité (capacité de changement rapide aux modifications de l'outil de production) et valeur (la satisfaction du client). Une façon de la mesurer consiste à mesurer la distance entre ce que l'entreprise obtient avec les moyens dont elle dispose et ce qu'elle souhaite atteindre comme objectif.

#### I.3.3.2 La sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement (SdF) des systèmes de production automatisés est une nécessité économique. Elle consiste à assurer le respect du cahier des charges en terme de productivité, en tenant compte des perturbations (défaillances, aléas, etc.) infectant un

atelier en assurant une qualité et une disponibilité maximale. Optimiser la commande devient illusoire si l'outil de production tombe souvent en panne.

Elle intègre les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité. Elle consiste à connaître, détecter, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des machines. L'intégration d'un service de maintenance est indispensable pour l'amélioration de la SdF et l'augmentation des performances des systèmes de production.

## **I.3 Généralités sur l'ordonnancement dans les systèmes de production**

### **I.3.1 Présentation des problèmes d'ordonnancement**

En dehors de tout contexte d'application, les problèmes d'ordonnancement sont définis comme : la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (activités) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et techniques), en cherchant à optimiser certains critères ou objectifs (financiers ou technologiques), tout en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation [EL, 1999]. Établir un ordonnancement revient donc à coordonner l'exécution de toutes les tâches, en utilisant au mieux les ressources disponibles.

En d'autres termes, il s'agit de : « déterminer ce qui va être fait, quand, où et avec quels moyens. Etant donné un ensemble de tâches à accomplir, le problème d'ordonnancement consiste à déterminer quelles tâches doivent être exécutées et à assigner des dates et des ressources à ces tâches de façon à ce que les tâches soient, dans la mesure du possible, accomplies en temps utile, au moindre coût et dans les meilleures conditions » [Parunak H, 1985].

Les différentes données sont donc : les tâches, les ressources, les contraintes et les objectifs.

Une solution à un tel problème consiste à trouver une planification des tâches sur les ressources en optimisant les objectifs et en respectant les contraintes.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons principalement aux problèmes d'ordonnancement d'atelier.

### **I.3.2 Formulation d'un problème d'ordonnancement**

#### **I.3.2.1 Les tâches et les opérations**

La réalisation d'un ordonnancement d'atelier est décomposable en tâches (dits aussi travaux, pièces ou produits). Une opération est une entité élémentaire d'une tâche qui a une date de début et une date de fin. Son exécution est caractérisée par une durée appelée temps opératoire ou temps d'exécution et nécessite l'utilisation d'une ou plusieurs ressources. Les opérations peuvent être exécutées par morceaux, on parle alors d'opérations morcelables ou encore de problèmes préemptifs. Dans ce cas, l'exécution d'une opération peut être interrompue et reprise ultérieurement tout en poursuivant l'exécution de l'opération à partir de

l'état où elle a été interrompue [Carlier J, 1988]. Il existe aussi certains cas où la préemption d'une opération est permise mais son exécution nécessite de recommencer l'opération totalement ou partiellement. Dans d'autres cas, les opérations doivent être exécutées sans interruption. Il s'agit d'opérations non morcelables [Esquirol P, 1999] qui ne peuvent pas être interrompues avant que leur exécution sur une ressource donnée ne soit terminée.

Une tâche  $J_j$  est localisée dans le temps par :

$p_{ij}$ : La durée opératoire de la tâche  $J_j$  sur la machine  $M_i$ .

$r_{ij}$ : La date de début au plus tôt ou date de disponibilité de la tâche  $J_j$  sur la machine  $M_i$ .

$d_{ij}$ : La date de fin au plus tard ou (deadline) de la tâche  $J_j$  sur la machine  $M_i$ .

$t_{ij}$ : La date de début d'exécution de la tâche  $J_j$  sur la machine  $M_i$ .

$c_{ij}$ : La date de fin d'exécution de la tâche  $J_j$  sur la machine  $M_i$ .

$T_{ij}$ : Le retard vrai de la tâche  $J_j$  sur la machine  $M_i$   $T_{ij} = \max \{0, c_{ij} - d_{ij}\}$ .

$U_{ij}$ : L'indice de retard Tel que  $U_{ij}=1$  si la tâche  $J_j$  est en retard, 0 sinon.

$W_j$ : Le poids de la tâche  $J_j$ .

### 1.3.2.2 Les ressources

Une ressource est un moyen, technique ou humain, dont la disponibilité limitée ou non est connue a priori. Deux types de ressources peuvent être distingués: les ressources renouvelables et les ressources consommables [Belkaid F, 2014].

- **Ressource renouvelable:** Une ressource est dite renouvelable si, après avoir été affectée à une tâche, elle redevient disponible pour les autres (machine, fichier, processeur, homme, ...). Parmi les ressources renouvelables, nous distinguons les ressources disjonctives, ces dernières, ne peuvent exécuter qu'une opération à la fois; et les ressources cumulatives, qui, quant à elles peuvent exécuter, simultanément, un nombre limité d'opérations.
- **Ressource consommable:** Une ressource est dite consommable où non-renouvelable si, après avoir été allouée à une tâche, elle n'est plus disponible pour les tâches restantes, comme par exemple l'argent, la matière première, etc. De plus, lorsqu'une tâche n'a besoin que d'une seule ressource pour pouvoir être exécutée, on dira alors que c'est un problème d'ordonnancement mono-ressource, où, au contraire c'est un problème d'ordonnancement multi-ressources, dans le cas où l'exécution d'une tâche nécessite plusieurs ressources.
- **Ressources doublement contraintes ou limitées :** qui combinent les contraintes liées aux deux catégories précédentes. Elles présentent une limitation de leur utilisation instantanée et de leur consommation globale. C'est le cas des ressources d'énergie (pétrole, électricité, etc.).

De plus, lorsqu'une tâche n'a besoin que d'une seule ressource pour pouvoir être exécutée, on dira alors que c'est un problème d'ordonnancement mono-ressource, où, au contraire c'est un problème d'ordonnancement multi-ressources, dans le cas où l'exécution d'une tâche nécessite plusieurs ressources.

### I.3.2.3 Les contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables de décision, liées aux tâches et aux ressources. Il s'agit des conditions à respecter lors de la construction d'un ordonnancement pour qu'il soit réalisable. Il existe deux catégories de contraintes : les contraintes temporelles et les contraintes de ressources. Le premier type concerne les contraintes d'antériorité ou de cohérence technologique, qui décrivent des relations d'ordre relatif entre les différentes tâches, les délais de fabrication imposés et les contraintes d'interdiction, d'autorisation ou d'interruption des tâches, etc. Quant au second type, il est lié aux caractéristiques d'utilisation et de disponibilité des ressources utilisées par les tâches. Deux types de contraintes de ressources se distinguent par rapport à la nature disjonctive ou cumulative des ressources.

### I.2.3.4 Les critères d'évaluation

Pour évaluer la qualité d'un ordonnancement, il existe plusieurs critères généralement liés aux temps, aux ressources ou aux coûts. Il s'agit, le plus souvent, de considérer le maximum ou la somme (qui peut être une somme totale ou pondérée) sur toutes les tâches d'une certaine mesure ou d'une combinaison de plusieurs mesures. Parmi les critères les plus utilisés, nous retrouvons :

- **La durée totale de l'ordonnancement (makespan)** définie par  $C_{max} = \max C_j$ ,  $C_j$  étant la date de fin d'exécution de la tâche  $j$  qui représente la date d'achèvement de la tâche la plus tardive. En minimisant ce critère, nous avons une utilisation plus efficace des ressources.
- **La somme des dates de fin des tâches**  $\sum_{1 \leq j \leq n} C_j$ .
- **Le plus grand retard algébrique** défini par  $L_{max} = \max L_j$ , tel que  $L_j = C_j - d_j$  est le retard algébrique (lateness en anglais) et  $d_j$  désigne la date de fin souhaitée ou encore la date d'échéance (due date en anglais).
- **Le plus grand retard vrai**  $T_{max} = \max_{1 \leq j \leq n} T_j$ , ou  $T_j = \max(0, C_j - d_j)$  est le retard vrai (tardiness en anglais) du tâche  $j$ .
- **La somme des retards**  $\sum_{1 \leq j \leq n} T_j$ .
- **Le nombre de tâches en retard**  $\sum_{1 \leq j \leq n} U_j$ ,  $U_j$  étant l'indicateur de retard qui est égal à 1 si  $T_j > 0$  et 0 sinon ;

- **La somme des avances**  $\sum_{1 \leq j \leq n} E_j$ , tel que  $E_j = \max(0, d_j - C_j)$  représente l'avance (earliness en anglais) de la tâche  $j$  ;
- **La somme des encours**  $\sum_{1 \leq j \leq n} F_j$ , définie par le temps de séjour des tâches (flowtime en anglais) dans l'atelier.  $F_j = C_j - r_j$ ,  $r_j$  étant la date de disponibilité de la tâche  $j$ .

Dans certains cas, où les objectifs de l'entreprise sont multiples, nous cherchons à optimiser plusieurs fonctions objectives à la fois. Dans ce cas, le problème d'ordonnancement n'est plus un problème simple, mais devient un problème multicritère [Belkaid F, 2014].

### I.3.3 Caractéristiques générales des ordonnancements

- **Ordonnancement admissible:** un ordonnancement est dit admissible s'il respecte toutes les contraintes du problème, à savoir les dates limites, précédences, limitation des ressources, etc.
- **Ordonnancement actif:** dans un ordonnancement actif, aucune tâche ne peut commencer plutôt sans reporter le début d'une autre.
- **Ordonnancement semi-actif:** dans un ordonnancement semi actif, on ne peut avancer une tâche sans modifier la séquence sur la ressource.
- **Ordonnancement sans retard:** dans un ordonnancement sans retard, on ne doit pas retarder l'exécution d'une tâche, si celle-ci est en attente et si la ressource est disponible.

### I.3.4 Problèmes d'ordonnancement d'ateliers

Un problème d'ordonnancement d'atelier consiste à déterminer la séquence de passage d'un certain nombre d'opérations à exécuter sur différentes machines. Il s'agit de prévoir le travail à réaliser, de façon à coordonner l'utilisation des ressources renouvelables et non renouvelables afin de satisfaire les différentes contraintes et d'optimiser un ou plusieurs critères de performances.

- **Classification des problèmes d'ordonnancement**

Une classification peut s'opérer selon le nombre de machines et leur ordre d'utilisation pour fabriquer un produit qui dépend de la nature de l'atelier. Un atelier est défini par le nombre de machines qu'il contient et par son type.

Les différents types possibles sont les suivants:

- **Une machine  $\emptyset$ :** chacune des tâches doit être réalisée par une seule machine. Donc chaque tâche est constituée d'une seule opération.
- **Machines parallèles:** elles remplissent, à priori, toutes les mêmes fonctions, selon leur vitesse d'exécution, on distingue :



- **Machines identiques (P):** la vitesse d'exécution est la même pour toutes les machines  $M_i$  et toutes les tâches  $J_j$ .
- **Machines uniformes (Q):** chaque machine  $M_i$  a une vitesse d'exécution propre et constante, la vitesse d'exécution est la même pour toutes les tâches  $J_j$  d'une même machine  $M_i$ .
- **Machines indépendantes (R):** la vitesse d'exécution est différente pour chaque machine  $M_i$  et pour chaque tâche  $J_j$ .

- **Machines dédiées:** elles sont spécialisées dans l'exécution de certaines opérations. Dans cette catégorie, chaque tâche est constituée de plusieurs opérations. En fonction du mode de passage des opérations sur les différentes machines, trois ateliers spécialisés sont différenciés, à savoir :

- **Flow Shop de permutation (F) (à cheminement unique)** (figure 1.4): c'est un cas particulier du problème d'ordonnancement d'atelier pour lequel le cheminement des tâches est unique: les  $n$  tâches utilisent les  $m$  machines dans l'ordre 1,2, . . . ,  $m$  (ligne de production).



Figure 1.4 Représentation d'un atelier Flow Shop.

- **Job Shop (J) (à cheminement multiple)** (figure 1.5): les  $n$  tâches doivent être exécutées sur les  $m$  machines, sous des hypothèses identiques à celles du flow shop, la seule différence est que les séquences opératoires relatives aux différents tâches peuvent être distinctes et sont propres à chaque tâche.

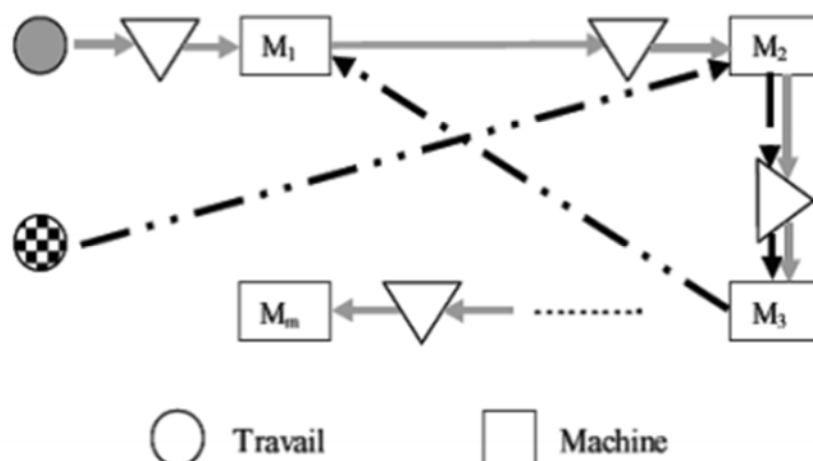


Figure 1.5 Représentation d'un atelier Job Shop.



- **Open Shop (O) (à cheminements libres)**: c'est un modèle d'atelier moins contraint que le flow shop et le job shop, car l'ordre des opérations n'est pas fixé à priori. Le problème d'ordonnancement consiste d'une part à déterminer le cheminement de chaque tâche et d'autre part à ordonnancer les tâches en tenant compte des gammes. Notons que ces deux problèmes peuvent être résolus simultanément. En comparaison aux autres modèles d'ateliers multi-machines, l'open shop qui n'est pas non plus courant dans les entreprises, n'est pas très étudié dans la littérature.

Une notation proposée par [Rinnooy K, 1976] est couramment utilisée pour distinguer un problème d'ordonnancement de manière synthétique et précise. Elle est composée de trois champs d'identification, qui sont notés par le triplet  $\alpha/\beta/\gamma$

-  $\alpha = \alpha_1 \alpha_2$ : décrits les caractéristiques des machines.

$\alpha_1 \in \{\emptyset, P, R, O, F, J\}$

$\emptyset$ : ordonnancement sur une seule machine.

$P$ : ordonnancement sur plusieurs machines parallèles et identiques.

$Q$ : ordonnancement sur plusieurs machines parallèles et uniforme.

$R$ : ordonnancement sur plusieurs machines parallèles et indépendantes.

$O$ : il s'agit d'un problème (Open Shop).

$F$ : il s'agit d'un problème (Flow Shop).

$J$ : il s'agit d'un problème (Job Shop).

$\alpha_2$ : le nombre de machines.

-  $\beta$ : l'ensemble des contraintes.

-  $\gamma$ : le critère à optimiser.

### Exemples:

**Q2 / pmtn, prec / Lmax**: Ce problème a pour objectif la minimisation du retard maximal sur deux machines parallèles uniformes. Existence de contrainte de précédences et possibilité d'interruption des tâches.

**F3 / Vi /  $\sum Ti$** : Représente les problèmes de minimisation de la somme des retards en Flow Shop à 3 machines avec contrainte des dates de disponibilité.

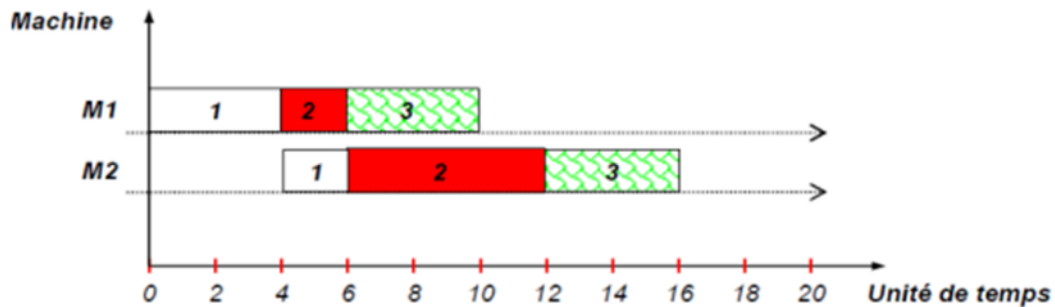
### I.3.5 Représentation d'un ordonnancement

En ordonnancement, il est utile de disposer d'une représentation graphique plus précise des solutions établies. Ce but est atteint par l'utilisation d'un diagramme de Gantt. Ce diagramme constitue un formalisme graphique qui a été mis au point par Henry Gantt en 1910. Il s'agit d'un outil qui est couramment utilisé pour représenter la solution d'un problème d'ordonnancement. Il permet de visualiser l'utilisation des machines, l'avancement de l'exécution des opérations sur celles-ci ainsi que les dates de début et de fin de chaque opération. La Figure ci-après représente le diagramme de Gantt associé à l'ordonnancement de trois tâches (J1, J2, J3) dans un atelier flow-shop à deux machines. Les durées opératoires sont données dans le tableau suivant :

	<b>J1</b>	<b>J2</b>	<b>J3</b>
<b>M1</b>	4	2	4
<b>M2</b>	2	6	4

**Tableau 1.1** Temps opératoires pour l'exemple d'un flow-shop

À partir de ce diagramme on peut déterminer par exemple la valeur de la date d'achèvement de la tâche la plus tardive.



**Figure 1.6** Exemple d'un diagramme de Gantt.

### I.3.6 Complexité des problèmes d'ordonnancement

Les problèmes d'ordonnancement d'ateliers, sont des problèmes combinatoires, extrêmement difficiles et il n'existe pas de méthode universelle permettant de résoudre efficacement tous les cas, beaucoup d'entre eux peuvent prendre un temps considérable pour être résolus. La théorie de la complexité des algorithmes a donné un sens précis aux termes d'algorithme efficace et de problème difficile.

**- Les classes P et NP :**

Pour pouvoir exposer la notion de classe de problèmes, il est tout d'abord nécessaire de distinguer les problèmes de décision des problèmes d'optimisation. Un problème de décision est un problème pour lequel la réponse est "oui" ou "non". Il est possible d'associer à chaque problème d'optimisation, un problème de décision en introduisant un seuil  $k$  correspondant à la fonction objectif  $f$ . Le problème de décision devient : "existe-t-il un ordonnancement réalisable ( $S$ ) tel que  $f(S) \leq k$ ?".

Il est alors possible de définir la classe de complexité P qui regroupe l'ensemble des problèmes de décision qui peuvent être résolus par des algorithmes déterministes en un temps polynomial, c'est à dire la complexité dans le pire des cas est polynomiale. Les problèmes appartenant à cette classe sont relativement simples à résoudre [Belkaid F, 2014].

La classe NP regroupe les problèmes qui peuvent être résolus en temps polynomial par un algorithme non déterministe (Algorithme qui comporte des instructions de choix) [Giard V, 2003]. Pour ces algorithmes, si à chaque instruction le bon choix est effectué, le temps de calcul est polynomial. Si au contraire tous les choix sont énumérés, l'algorithme devient déterministe et son temps de calcul devient exponentiel. Les algorithmes "ordinaires" sont évidemment des cas particuliers des algorithmes non déterministes [Flipo C, 1998]. Aussi tout problème de décision qui peut être résolu par un algorithme polynomial, et qui donc appartient à la classe P, appartient également à la classe NP. D'où  $P \subseteq NP$ .

**I.3.7 Méthodes de résolution**

Les problèmes d'ordonnancement d'atelier sont des problèmes d'optimisation combinatoire qui nécessitent d'effectuer un nombre important de calculs pour obtenir un ordonnancement admissible (ou réalisable) qui optimise le (ou les) critère(s) retenu(s) en tenant compte des contraintes. Le développement de la théorie de complexité a permis de classer ces problèmes selon leurs difficultés [Rinnooy K, 1976]. Dans la plupart des cas, ils ont été démontrés NP-difficiles. La principale difficulté à laquelle est confronté un décideur, en présence d'un problème d'optimisation est celui du choix d'une méthode efficace capable de produire une solution optimale en un temps de calcul raisonnable. Les différentes méthodes de résolution développées peuvent être classées en deux catégories: les méthodes exactes et les méthodes approchées. La programmation dynamique, les méthodes par séparation et évaluation ("Branch-and-Bound") et la programmation linéaire en nombres entiers, sont les principales méthodes de résolution exacte. Elles nous permettent de trouver une solution optimale grâce à une exploration efficace de l'espace des solutions. De manière générale, ce type d'approches permet de résoudre les problèmes d'ordonnancement de petite taille, mais il reste difficile de fournir une résolution exacte en un temps raisonnable lorsque les problèmes sont de taille importante. D'où la nécessité d'adopter des méthodes de résolution approchée proposant des solutions acceptables en un temps de calcul réduit.

### I.3.7.1 Les méthodes exactes

Les techniques de résolution exacte sont définies pour les problèmes combinatoires en général. L'énumération exhaustive est la méthode la plus simple. Les méthodes par séparation et évaluation et la programmation dynamique font une énumération intelligente des solutions possibles. Pour des problèmes difficiles de grande taille, la durée d'exécution est démesurée et il faut envisager une résolution approchée. Ils sont exposés dans la suite.

#### ➤ La procédure par séparation et évaluation

Elles sont aussi appelées méthodes arborescentes. Ce sont des méthodes exactes qui pratiquent une énumération complète et améliorée des solutions. Elles partagent l'espace des solutions en sous-ensembles de plus en plus petits, la plupart étant éliminés par des calculs de bornes. Appliquées à des problèmes NP-difficiles, ces méthodes restent bien sur exponentielles, mais leur complexité est bien plus faible que pour une énumération exhaustive. Elles peuvent pallier le manque d'algorithmes polynomiaux pour des problèmes de taille moyenne.

Pour un POC (Problème d'ordonnancement combinatoire), on peut inventer plusieurs méthodes par séparation et évaluation. Cependant elles auront trois composantes communes :

- Une règle de séparation, permettant de partitionner un ensemble des solutions en sous-ensembles.
- Une fonction d'évaluation, permettant le calcul d'une borne pour un ensemble de solutions.
- Une stratégie d'exploration de l'arborescence de recherche.

#### ➤ La programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode fondée sur le principe de Bellman qui assure que la sous-stratégie d'une politique optimale est-elle même optimale. Cette procédure est basée sur la division récursive d'un problème en sous-problèmes plus simples. Ainsi, le système est constitué de plusieurs étapes à résoudre de façon séquentielle. Chaque étape correspond à un sous-problème que nous résolvons de façon optimale en tenant compte des informations obtenues au cours des étapes précédentes. Cela nécessite une formulation du critère sous la forme d'une relation de récurrence reliant deux niveaux consécutifs. Cependant, le passage d'une étape à une autre peut être basé sur les lois d'évolution du système et d'une décision. La procédure évite une énumération totale de l'espace de recherche par des séquences de décision partielle d'élagage qui ne peuvent pas conduire à la solution optimale.

### I.3.7.2 Les méthodes approximatives

Les méthodes approchées représentent une alternative intéressante pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoires NP-difficiles. Contrairement aux méthodes

exactes qui cherchent les solutions optimales, les méthodes approximatives fournissent des solutions acceptables en un temps raisonnable. Les méthodes les plus connues pour leurs aptitudes à résoudre ce type de problèmes sont essentiellement les heuristiques de construction, les heuristiques de décomposition et les métaheuristiques [Azem S, 2010].

#### ➤ Les heuristiques de construction

Ces heuristiques ont pour objectif de construire itérativement une solution à un problème d'ordonnancement. Elles consistent à définir des priorités entre les tâches qui sont en attente de traitement sur une machine. Les méthodes les plus couramment utilisées sont des algorithmes dont le principe est de trier les opérations selon une stratégie de décision telle que LPT (Longest Processing Time first), SPT (Shortest Processing Time first), etc.

#### ➤ Les heuristiques de décomposition

Cette classe permet de fournir des solutions approximatives à des problèmes complexes en décomposant le problème en plusieurs sous-problèmes. Selon Azem [Azem S, 2010] nous pouvons définir trois familles qui sont :

- La décomposition hiérarchique proposée par Erscher consiste à décomposer le problème en plusieurs niveaux, dont les décisions deviennent des contraintes pour les niveaux inférieurs.
- La décomposition temporelle proposée par Portmann consiste à ordonnancer les sous-ensembles d'opérations disponibles avant une date et inclure les autres dans la séquence partielle. Cette technique est utilisée pour les problèmes d'ordonnancement dynamique.
- La décomposition spatiale proposée par Portmann qui a pour objectif de décomposer l'atelier en plusieurs sous-ateliers avec un minimum de mouvements entre eux, ordonnancer les opérations dans chaque atelier et enfin coordonner l'ensemble.

#### ➤ Les méta-heuristiques

L'inconvénient des méthodes de voisinage est qu'elles restent parfois bloquées dans un minimum local, les méta-heuristiques dépassent cet inconvénient. L'idée consiste à autoriser une détérioration temporaire de l'objectif, permettant ainsi de quitter un minimum local.

Les méta-heuristiques sont largement utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Leur succès est dû au fait qu'elles permettent d'intégrer les différentes contraintes pratiques des problèmes. Elles sont faciles à mettre en œuvre et offrent des solutions acceptables.

## **Conclusion**

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre des généralités sur la production et les systèmes de production. Pour délimiter les contours de notre étude, nous nous sommes concentré dans la deuxième partie sur les principales définitions et notations, la classification des problèmes d'ordonnancement, les types et les représentations des ordonnancements et la complexité des problèmes d'ordonnancement.

# **Chapitre II**

**La maintenance des systèmes  
de production**

## Introduction

La principale conséquence du développement industriel est la complexité croissante des machines et des équipements de production. Ainsi, pour satisfaire une demande de produits avec une meilleure qualité et à des prix compétitifs tout en respectant les délais de livraison, le développement des ateliers manufacturiers doit intégrer à la fois automatisation et flexibilité. D'où l'augmentation du risque d'occurrence des pannes qui se traduit par un temps croissant de détection et de réparation des machines. Cela aurait, dans ce cas, pour effet la diminution de la disponibilité du système global. Les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production [Benbouzid F,2005].

Les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production manufacturiers. La maintenance, jusqu'à très récemment, était considérée comme un centre de coûts. Actuellement, les gestionnaires et décideurs, dans l'entreprise, sont de plus en plus conscients qu'elle peut contribuer d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise. La complexité des mécanismes de dégradation des équipements a fait en sorte que la durée de vie de ces derniers a toujours été traitée comme une variable aléatoire. Cet état de fait a incité plusieurs entreprises à adopter des approches plutôt réactives, n'étant pas en mesure de justifier économiquement les avantages que peut procurer la mise en place d'une maintenance préventive [Benbouzid,2008].

Ce chapitre est présenté en deux parties. Dans la première partie, on abordera succinctement la maintenance des systèmes de production, quand à la deuxième partie elle sera consacrée à l'ordonnement de la maintenance.

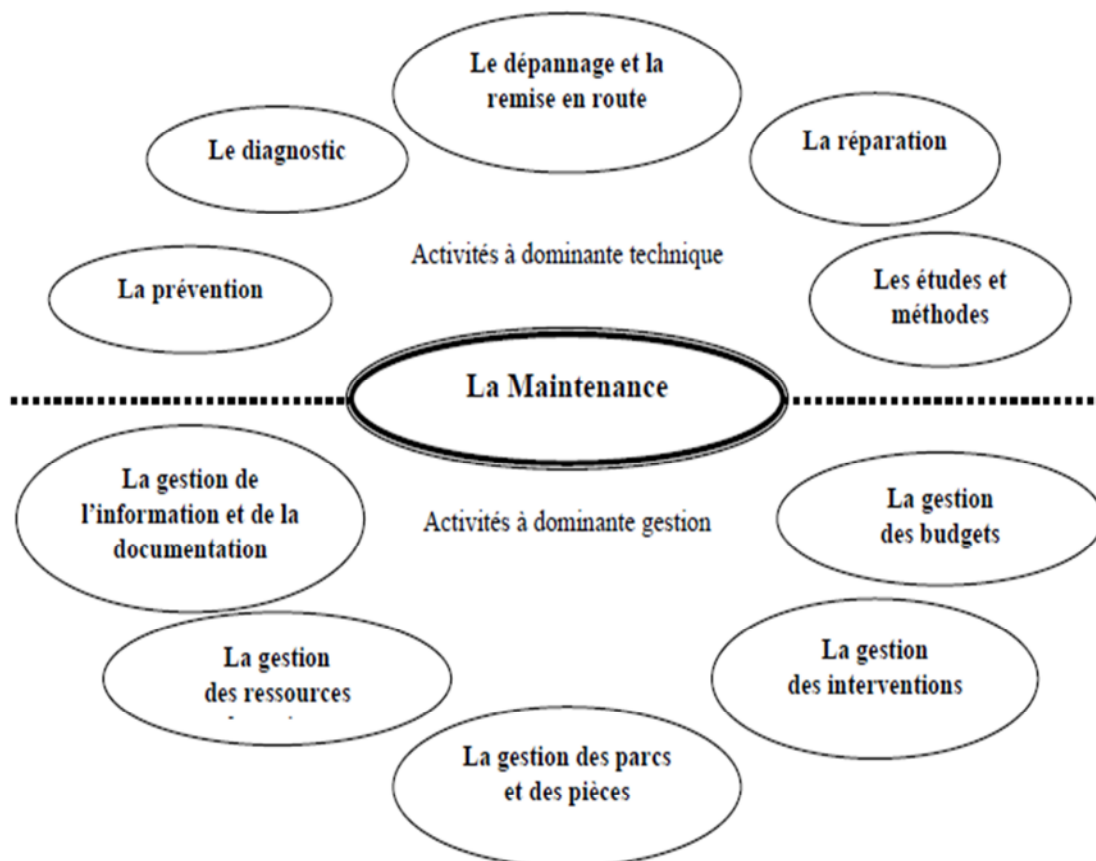


## II La maintenance dans les systèmes de production :

### II.1 La maintenance

Une première définition normative de la maintenance fut donnée par l'AFNOR en 1994 (norme NF X 60-010), à savoir « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». AFNOR se fait plus précise en apportant un complément avec le document X 60-000 « Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût optimal ». Depuis 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. »

Retour & al [Retour,1990] présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion comme le montre la figure 2.1.



**Figure 2.1** Le contenu de la fonction maintenance.

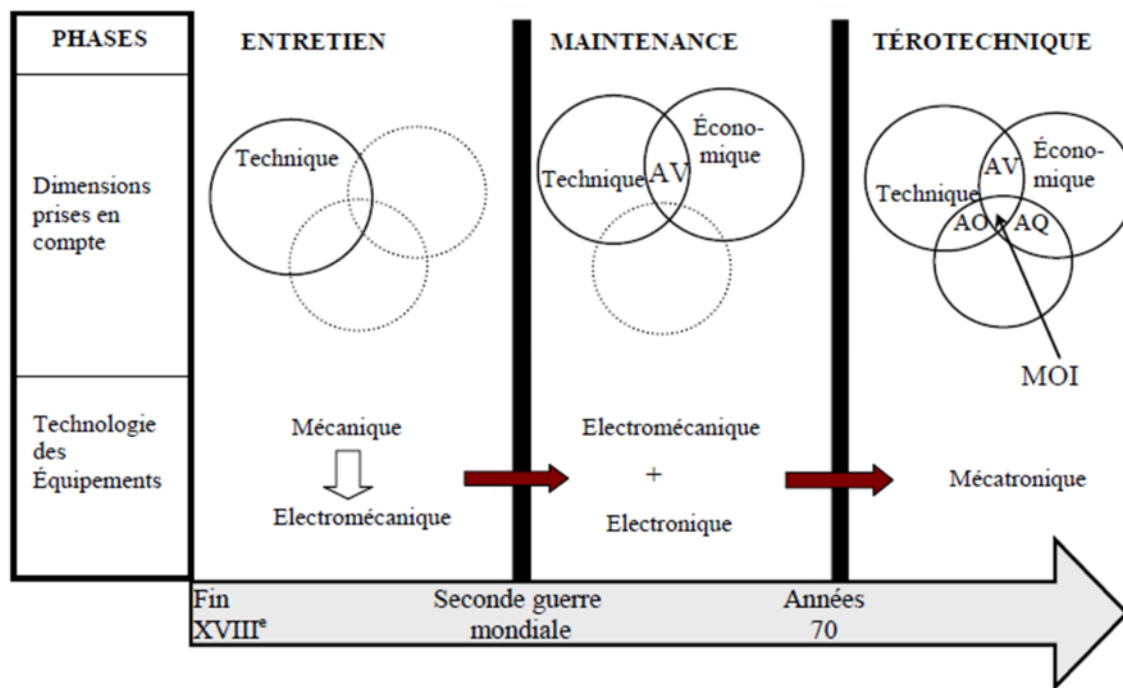
## II.1.2 Evolution de la maintenance

Les premières approches scientifiques de la gestion de maintenance datent des années cinquante et soixante [McCALL,1965], [Pierskalla,1976]. A cette époque, la maintenance a été préconisée comme un moyen permettant de réduire les défaillances et les accidents imprévus. Dans plusieurs entreprises, de très gros programmes de maintenance basés sur le temps (préventive) ont été développés. Les premiers modèles de recherche opérationnelle pour la maintenance sont apparus dans les années soixante pour essayer d'optimiser ces programmes [Verdol,1988]. Dans les années soixante-dix, grâce aux contrôles des ateliers et à la surveillance, l'utilisation de l'information sur l'état actuel de l'équipement a permis de se concentrer sur des techniques pouvant prédire des défaillances. Cela semblait être plus efficace que les gros programmes de maintenance préventive. Des études détaillées de la part des fabricants, des défaillances de leurs produits ont abouti à de meilleures conceptions, avec moins de défaillances. Dans les années quatre-vingt, l'ordinateur apporte de l'aide à la fonction maintenance. Initialement, il a été utilisé pour faciliter les tâches administratives, ensuite pour la gestion de l'information disponible et, de nos jours, pour l'aide à la décision [Boulenger,1988].

Les progrès technologiques des équipements de production, fruits de la révolution industrielle, ont orchestré cette évolution de la fonction maintenance qui a connu trois phases (Figure 2.2) :

- 1- Dans la première phase dite d'entretien, la priorité est accordée à la réalisation (dimension technique de l'activité). La fonction maintenance était purement technique Elle était réduite aux dépannages et aux réparations, elle correspondait donc à ce qu'on appelle actuellement la maintenance corrective.
- 2- Dans la deuxième phase de maintenance proprement dite, l'importance est donnée à la dimension économique. La gestion du travail de maintenance et la gestion des coûts de maintenance sont le résultat de l'articulation des dimensions technique et économique, par l'analyse de la valeur (AV).
- 3- Dans la troisième dite térotechnique (de térotechnologie), où on s'intéresse à la dimension sociale impliquant les utilisateurs des équipements de production, qui a conduit à un mode d'organisation intégré (MOI) des fonctions maintenance et production.

⇒ « La térotechnologie est une combinaison de principes de gestion, de finance, d'ingénierie de construction, etc., appliqués à des actifs physiques dans la recherche de coûts de cycles de vie les plus économiques »



AV : Analyse de la Valeur.  
 AO : Analyse de l'Organisation.  
 AQ : Analyse de la Qualité.  
 MOI : Mode d'Organisation Intégrée.

Figure 2.2 Phase d'évolution de la fonction maintenance

### II.1.2 Objectifs de la maintenance

Selon la norme AFNOR FD X 60-000, les objectifs de la maintenance sont :

- la disponibilité et la durée de vie du bien ;
- la sécurité des hommes et des biens ;
- la qualité des produits ;
- la protection de l'environnement ;
- l'optimisation des coûts de maintenance ;
- etc.

Les missions principales de la fonction maintenance [Berrichi A,2009] sont de :

- Accroître **la fiabilité** du système, c'est-à-dire « l'aptitude du système à accomplir dans des conditions données et pendant un temps donnée, une fonction requise ».
- Assurer **la disponibilité** du système, c'est-à-dire « son aptitude à être en état d'accomplir sa fonction ».
- Accroître **la maintenabilité** du système, c'est-à-dire « l'aptitude du bien à être rétabli ou maintenu dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

Les concepts de fiabilité, disponibilité et maintenabilité sont des mots clés d'une nouvelle discipline qu'est la sûreté de fonctionnement.

### II.1.3 Classification des méthodes de maintenance

Il existe deux types de maintenances: la maintenance corrective et la maintenance préventive. La différence entre elles réside dans le moment d'intervention vis-à-vis de la panne. Le premier type de maintenance est appliqué après l'occurrence de la panne, alors que le deuxième type s'applique avant cette dernière.

#### II.1.3.1 Maintenance corrective

Selon la norme AFNOR NF EN 13306 X 60-319, c'est une « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

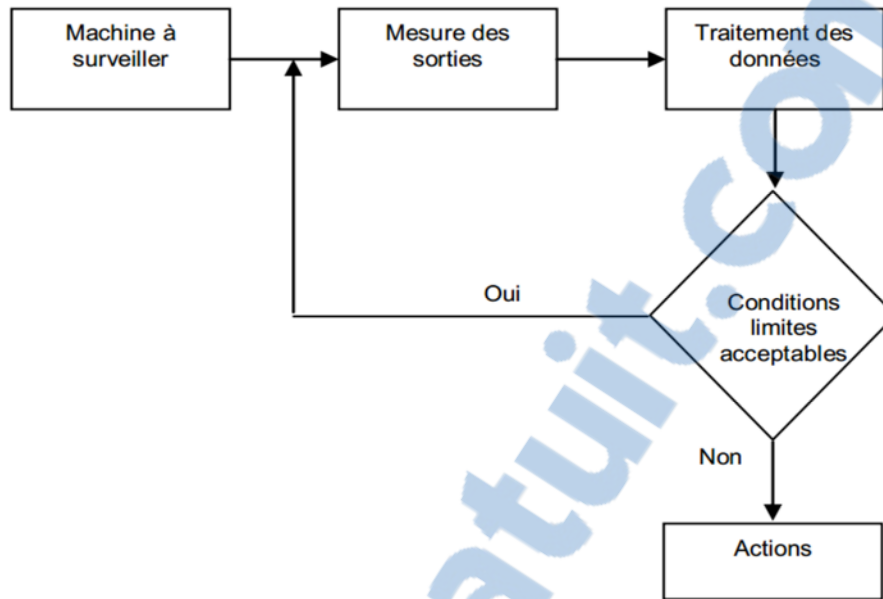
La maintenance corrective est le type de maintenance s'apparentant le plus à l'entretien traditionnel dans la mesure où on intervient sur le matériel après l'apparition d'une défaillance en vue de le remettre en service. On en distingue deux types:

- *Maintenance palliative* : concernant principalement des opérations de dépannage (action sur un bien en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement, provisoirement avant réparation) dont l'objectif est de supprimer les effets de la défaillance, elles sont de caractère provisoire.
- *Maintenance curative* : regroupe les opérations de réparation (intervention définitive et limitée de maintenance corrective), dont l'objectif est de ramener le matériel à un niveau de performance donné, elles sont de caractère définitif.

#### II.1.3.2 Maintenance préventive

Selon la norme AFNOR NF EN 13306 X 60-319, c'est une « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ». Donc c'est une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée. Il existe trois formes principales de la maintenance préventive :

- *Maintenance préventive systématique* : « Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien » (norme NF EN 13306 X 60-319). Cette maintenance comprend des inspections périodiques et des interventions planifiées.
- *Maintenance préventive conditionnelle* : « Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de son fonctionnement intégrant les actions qui en découlent » (norme NF EN 13306 X 60-319). Dans ce cas il n'y a pas d'échéancier mais c'est le franchissement d'un seuil qui provoque l'intervention. Elle peut être appliquée à des matériaux dont le comportement est peu ou pas connu.



**Figure 2.3** Structure de la maintenance conditionnelle

- *Maintenance préventive prévisionnelle*: Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle. Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Cependant, la maintenance systématique est coûteuse car l'usure des pièces dépend beaucoup des conditions de fonctionnement. Elle risque donc d'intervenir trop tôt ou trop tard [Deloux,2005].

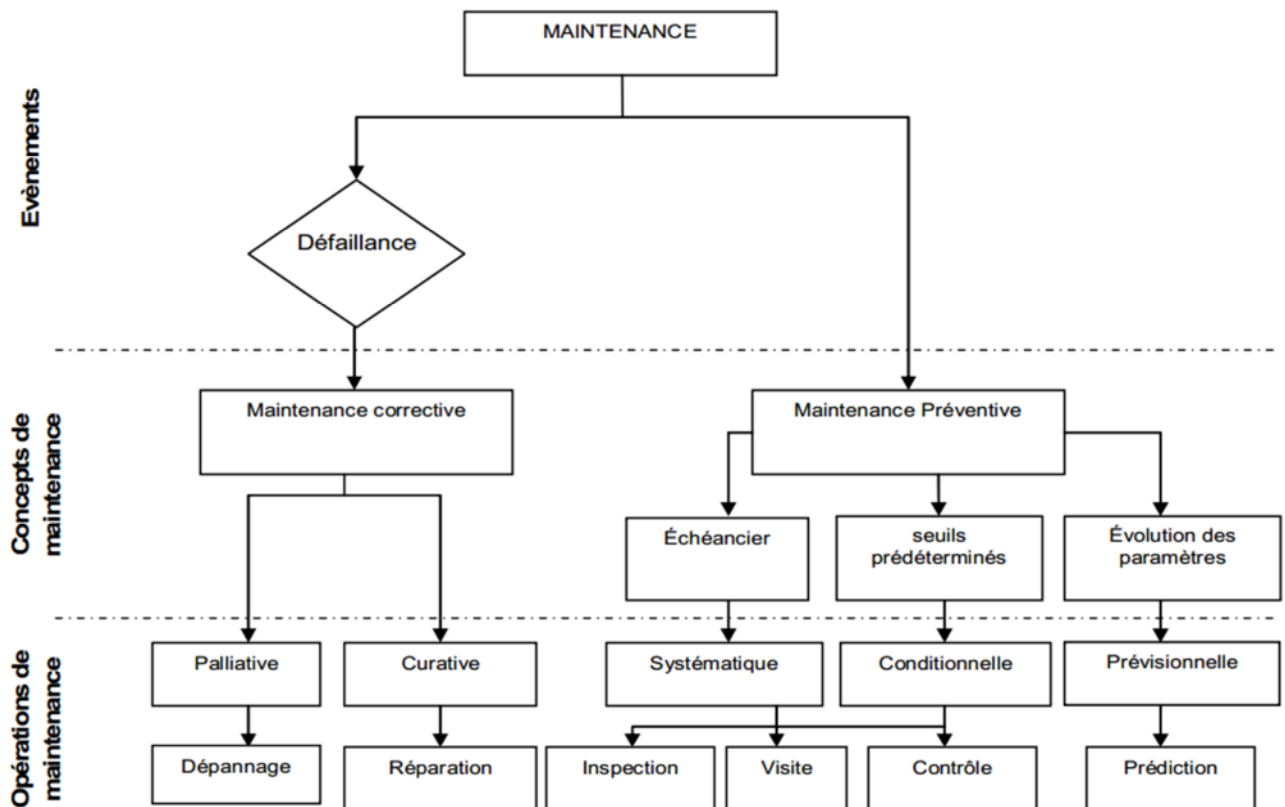


Figure 2.4 Les types de la maintenance

### II.1.4 Processus maintenance

Le processus Maintenance (parfois appelé fonction Maintenance) est constitué de différentes fonctions qui peuvent être :

- Préparation
- Réalisation travaux maintenance
- **Ordonnancement**
- Méthodes
- Achats
- Gestion de stock - Magasin

Nous abordons certaines fonctions à la suite.

- **Préparation :**

La préparation des travaux nécessite le plus de rigueur possible dans la collecte des informations pour définir le triplet « symptôme, cause et remède de panne ». Les informations peuvent être collectées par plusieurs intervenants avec pour support la GMAO mais nécessitent toujours rigueur et objectivité.

Analyse de panne: l'application d'une méthodologie d'analyse de panne est conseillée pour diminuer le temps de réparation : une procédure basée éventuellement sur une méthodologie (5 pourquoi, QQQCCP) est préconisée.

- **Ordonnement :**

La fonction d'ordonnement permet d'organiser le travail à réaliser :

- prévoir la chronologie du déroulement des différentes tâches de maintenance,
- optimiser les moyens nécessaires en fonction des délais,
- ajuster la charge,
- contrôler l'avancement et la fin des travaux,
- analyser les écarts entre les prévisions et les réalisations,
- avoir une vision à long terme (plan de charge annuel), à moyen terme et à court terme.

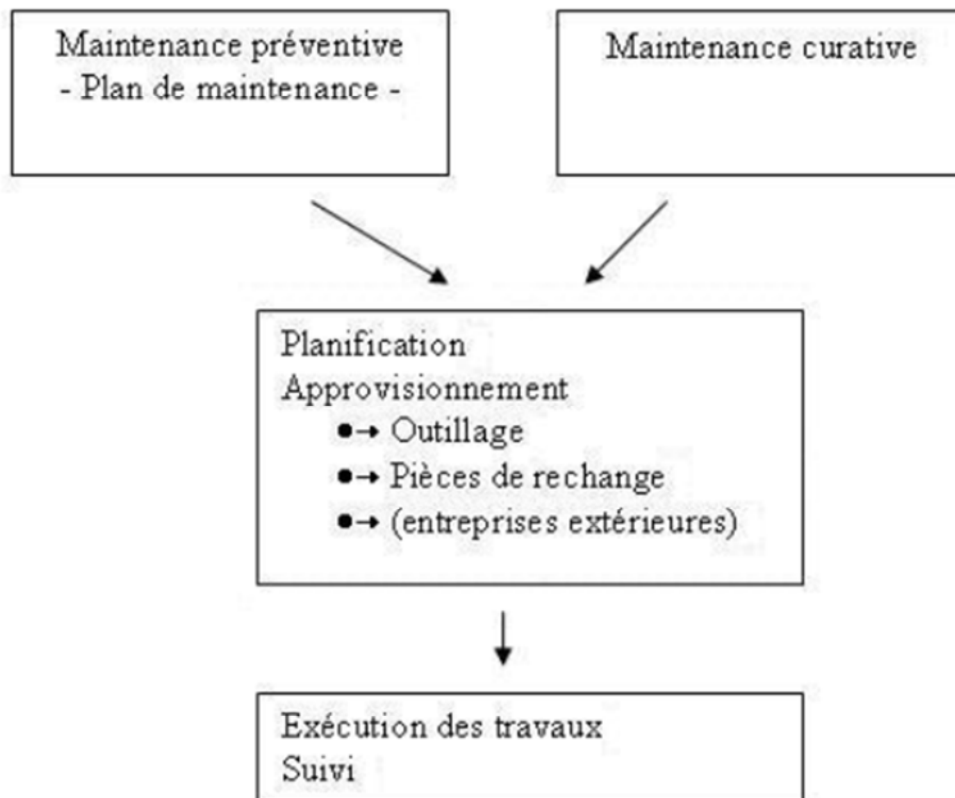


Figure 2.5 L'ordonnement de la maintenance

- **Méthodes :**

Le service méthodes assure la réflexion du fonctionnement du service maintenance sur la base de ses résultats de fonctionnement (documents, actions de maintenance). Le but est d'assurer l'efficacité de la maintenance, son amélioration en pérennisant les outils et les démarches et en mettant au point des améliorations:

- les mesurer
- les analyser
- les critiquer
- les améliorer

### II.1.5 Les niveaux de la maintenance

Les tâches de maintenance sont classées en cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches [Deloux,2005]:

- **Tâches de maintenance du 1<sup>er</sup> niveau :**

Comporte des réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage; ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité, sans avoir la nécessité à un outillage spécifique.

- **Tâches de maintenance du 2<sup>ème</sup> niveau :**

Comporte des opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou opérations mineures de maintenance préventive qui peuvent nécessiter un outillage standard.

- **Tâches de maintenance du 3<sup>ème</sup> niveau :**

Nécessite une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc...) sont nécessaires pour la remise en route correcte de l'équipement qui a nécessité l'intervention.

- **Tâches de maintenance du 4<sup>ème</sup> niveau :**

Est celui des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis tel que du matériel d'essai ou de test, un banc de contrôle, ...etc.

- **Tâches de maintenance du 5<sup>ème</sup> niveau :**

Comporte les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiés à un atelier central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur. Après avoir défini l'activité du service de maintenance dans le milieu industriel, nous allons maintenant en détailler la composition avec notamment ses ressources.

### II.1.6 La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur

La G.M.A.O. est une étape que les entreprises franchissent pour progresser vers plus d'efficacité, de rentabilité et de productivité. Une G.M.A.O. se doit de prendre en charge, d'une part, l'ensemble des données et des méthodes liées à une organisation de maintenance, puis d'en tirer les indicateurs stratégiques nécessaires à la prise des bonnes décisions.

D'autre part, elle se doit de répondre aux besoins quotidiens des hommes de la maintenance, c'est à dire permettre de réaliser des interventions sur des équipements avec le maximum d'efficacité. Pour cela, la G.M.A.O. va représenter la mémoire et le savoir-faire du service de maintenance. Traditionnellement, cette mémoire et ce savoir-faire représentent une base de travail commune entre les techniciens et les ingénieurs, ce qui engendre de grosses difficultés



pendant leurs absences. Bien sûr, dans beaucoup de cas, un historique papier des interventions est néanmoins enregistré dans un rapport journalier, mais l'information est longue à retrouver et le plus souvent ces rapports manquent de précision. La G.M.A.O., avec l'avantage de l'informatique, a permis de gérer la masse importante d'informations, de faciliter la recherche d'informations, de calculer des coûts et des ratios, et de proposer aux gestionnaires un planning de maintenance.

« Une GMAO est constituée d'une base de données (historique) qui est alimentée par le personnel de maintenance via un formulaire. Des pannes sont mises en mémoire pour certains équipements (date, temps passé, intervenant, matériel remplacé, etc.) ».

## II.2 L'Ordonnement de la maintenance

L'ordonnement de la maintenance a pour rôle de planifier la réalisation des tâches de maintenance sur les machines et équipements de la production, c'est à dire de fixer leurs dates de début et leurs dates de fin et de réunir tous les moyens prévus pour leur réalisation (machines, personnel, outils, pièces de rechanges, etc.) [Coudert,2000]. Il intervient chronologiquement entre la fonction « Méthodes » chargée d'initier les tâches en affectant une durée à un travail (temps alloué) et la fonction « Réalisation » (ou Lancement) chargée de mettre en œuvre l'intervention au moment choisi par l'ordonnement. Les activités principales en ordonnement de la maintenance sont la Programmation, le Lancement et l'Approvisionnement [Giard V,1988].

La programmation est l'action d'intégrer une tâche en attente sur un planning en lui choisissant des dates de début et de fin.

L'activité de lancement a pour mission de rassembler tous les moyens nécessaires, à la réalisation d'une tâche de maintenance, pour assurer leur disponibilité au moment choisi.

L'ordonnement de la maintenance est également responsable de la disponibilité des « consommables » et des pièces de rechange, donc d'assurer les approvisionnements nécessaires.

La notion d'ordre de travail de maintenance peut être rapprochée de celle d'opération de production et la notion de ressource de maintenance peut être rapprochée de celle de ressource de production. Le problème d'ordonnement de la maintenance revient donc à un problème d'affectation de ressources de maintenance à la réalisation d'ordres de travail de maintenance sur des machines du système de production, les ressources de maintenances étant constituées des opérateurs de maintenance [Paz,1994].

### II.2.1 Les niveaux hiérarchiques

L'ordonnement de la maintenance, à l'instar de l'ordonnement de la production, peut être décomposé de manière hiérarchique suivant trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel.

#### - Niveau stratégique : établir la politique de maintenance

Etablir la politique consiste à définir une structure, choisir une orientation et définir des objectifs. Les décisions prises ici sont limitées par des contraintes non négociables issues de la direction technique (budget, effectifs, espace, sécurité, etc.). La structure est établie en fonction des moyens mis à la disposition du service et des contraintes imposées, ses

composantes étant le personnel, les ateliers, les outillages, etc. Le choix de l'orientation et la définition des objectifs doivent être le fruit d'un travail d'analyse réalisé en concertation avec la production, cette dernière ayant des exigences et des attentes, la maintenance ayant des capacités et des compétences [Monchy,1996].

- *Niveau tactique : définir le plan de maintenance tactique*

La définition du plan de maintenance au niveau tactique est directement contrainte par les objectifs du niveau politique. Cette activité consiste à mettre en place un plan de maintenance et des méthodes de gestion de la structure physique de maintenance qui permettent d'atteindre ces objectifs. Les méthodes de gestion décrivent comment gérer chaque ressource de maintenance de la structure. Le plan de maintenance précise la forme d'action du service, c'est-à-dire les équipements à maintenir et le type de maintenance (préventive, curative), la proportion préventif/curatif visée, les formes de maintenance préventive (systématique, conditionnelle, intervalles et durées d'inspection prévues) et les formes de maintenance curative (dépannage, remise à neuf, amélioration).

Un échéancier de travaux préventifs spécifique à chaque équipement est ainsi obtenu avec les procédures d'action, celles-ci décrivent les opérations à réaliser, les ressources humaines et matérielles requises, les durées opératoires et les procédures de remise en service. Etablir un échéancier est une activité complexe : les paramètres pris en considération étant nombreux et souvent de nature stochastique, cela nécessite une analyse du contexte ainsi que l'évaluation des coûts générés. Les possibilités d'action étant très nombreuses, des choix bien souvent arbitraires doivent être faits, ce qui nécessite de consulter périodiquement les retours d'expérience. Ces consultations permettent soit de valider la stratégie adoptée, soit de modifier différents paramètres pour la corriger. L'échéancier ainsi obtenu devra être intégré à un planning de travaux correctifs au niveau décisionnel opérationnel.

- *Niveau opérationnel : définir le plan de maintenance opérationnel*

A ce niveau, le plan de maintenance tactique est mis en œuvre. Ainsi, sont coordonnées en temps réel. Les actions en réponse aux événements aléatoires correspondant aux défaillances des équipements et les actions issues de la programmation de travaux préventifs consignés dans le calendrier établi au niveau hiérarchique supérieur.

## **II.2.2 Les objectifs de l'ordonnement de la maintenance**

Les objectifs de l'ordonnement de la maintenance peuvent être décomposés de manière hiérarchique en distinguant les objectifs internes à la maintenance et les objectifs externes (Figure 2.8 [Coudert,2000]). Les objectifs internes concernent le fonctionnement propre du service de maintenance et les objectifs externes sont imposés par d'autres services (principalement la production). Ils peuvent se retrouver en conflit de par leur nature. Leur satisfaction impose généralement aux ressources de maintenance d'intervenir sur les machines à des dates bien précises qui ne correspondent pas nécessairement à une optimisation de leur utilisation.

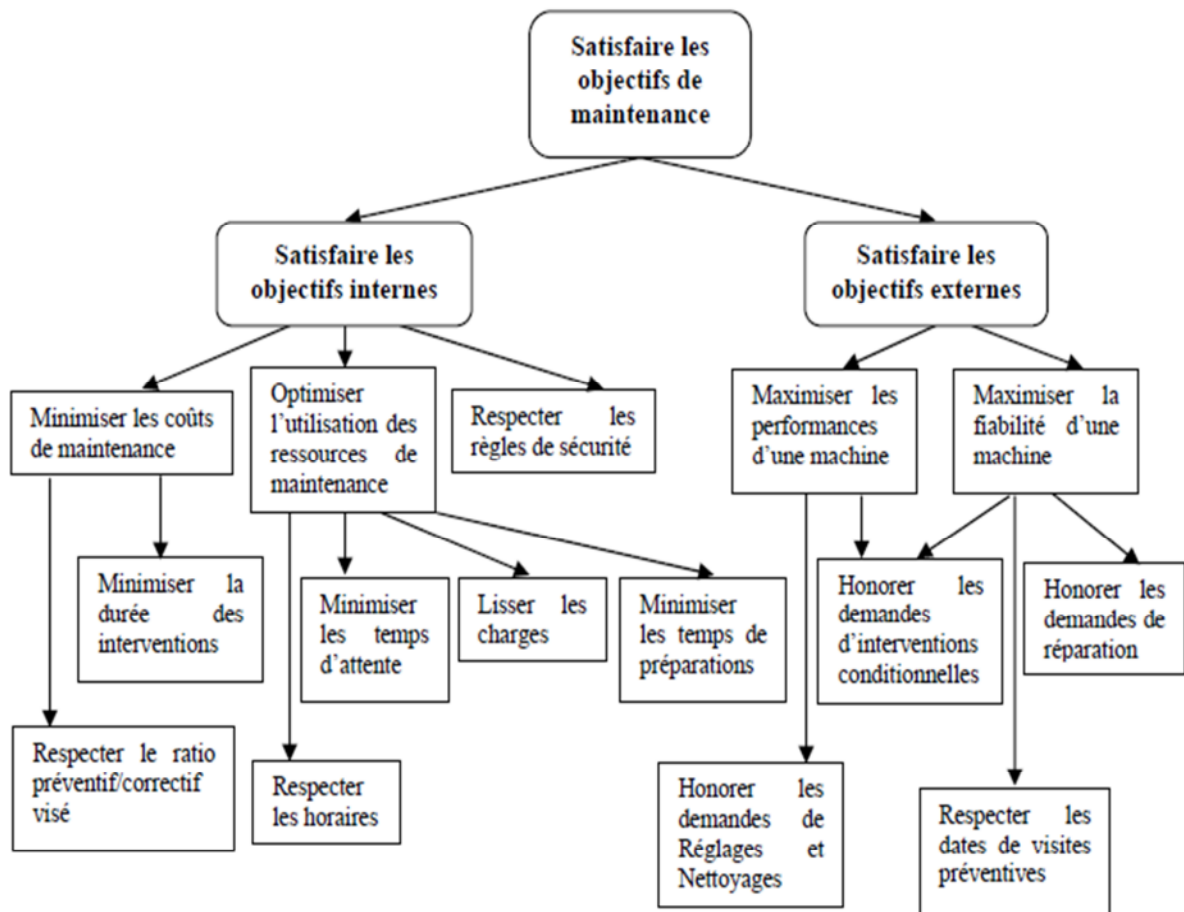


Figure 2.6 Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance

➤ **Les objectifs internes sont relatifs :**

- aux coûts de maintenance (respect du ratio préventif/correctif déterminé lors de la définition de la stratégie de maintenance ou encore la minimisation de la durée des interventions),
- à l'optimisation de l'utilisation des ressources de maintenance (tels que le respect des horaires des équipes, la minimisation des temps d'attente, le lissage des charges ou le regroupement des tâches de préparation afin d'en optimiser la durée),
- aux règles de sécurité (protection des intervenants pour les travaux dangereux).

➤ **Les objectifs externes sont relatifs :**

- aux performances des machines (honorer les demandes de réglages et de nettoyage et respecter les demandes d'interventions conditionnelles),
- à la fiabilité d'une machine (honorer les demandes de réparation et d'interventions conditionnelles, respecter les dates d'interventions préventives).

## **Conclusion**

La maintenance industrielle joue actuellement un rôle déterminant dans la conduite de la production. En effet, la recherche de l'accroissement des performances des ateliers de production, de plus en plus variés et complexes, conduit à transférer sur la fonction maintenance la responsabilité de garantir la disponibilité de ces systèmes. L'objectif de la maintenance devient alors l'identification réactive de l'élément défaillant (maintenance corrective) mais aussi la prévision des pannes afin de réduire la durée moyenne d'indisponibilité du système (maintenance préventive).

# **Chapitre III**

**L'Ordonnancement Conjoint  
Production / Maintenance**

## Introduction

La mise en place de liens entre les fonctions production et maintenance a toujours été une source de conflits dans les entreprises [Weinstein L, 1999]. Dans la plus part des travaux de la littérature qui traitant le problème d'optimisation de l'ordonnancement de la production et la planification de la maintenance, Les tâches de maintenance sont souvent planifiées séparément de l'ordonnancement sans tenir compte des exigences de l'un et l'autre. L'optimisation conjoint de la maintenance et de l'ordonnancement de production n'a attiré que récemment l'attention des chercheurs.

L'objectif de ce chapitre est, d'une part, de présenter notre problématique d'ordonnancement conjoint production maintenance et d'autre part de donner un aperçu sur quelques travaux qui ont été fait dans ce contexte.

Nous commencerons ce chapitre par la description de notre problématique. Ensuite nous présenterons les différentes politiques d'ordonnancement conjoint production maintenance recensées dans la littérature dont un état de l'art sur ces travaux sera présenté. Enfin, et pour encadrer notre travail nous présenterons le système MPS500 où nous avons appliqué notre méthode de résolution proposé.

### III.1 Ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance

#### III.1.1 Problématique

Dans le domaine de la production industrielle, les tendances actuelles indiquent que les systèmes manufacturiers performants doivent s'adapter rapidement aux fluctuations du marché où les demandes de produit deviennent aléatoires, et aux perturbations internes à l'atelier dues aux pannes des machines. Les machines doivent pouvoir fabriquer plusieurs types de produits simultanément et de manière efficace. Dans un tel contexte, la planification optimale de la production et le contrôle en temps réel de ces machines deviennent de plus en plus préoccupants tant pour les investisseurs et producteurs que pour les consommateurs.

Pendant de nombreuses années, la maintenance a bien souvent été considérée comme un «mal nécessaire» par la production et n'a pas réellement été intégrée dans ses prises de décisions du niveau opérationnel. Grâce à un niveau d'encours élevé, l'occurrence de défaillances n'induisant pas de coûts de retards trop importants, la maintenance n'intervenait que pour les travaux correctifs. En conséquence, la coordination des décisions prises par la maintenance avec celles prises par la production n'a reçu qu'une attention limitée. Une situation de conflit s'est instaurée entre elles lorsqu'on a voulu implanter de nouvelles méthodes de gestion de production telles que le juste-à-temps. En effet, des liens beaucoup plus étroits devraient être mis en place et la maintenance prenait une place beaucoup plus importante dans le système. La coopération de la maintenance avec la production doit permettre d'assurer que l'ordonnancement de la production laisse du temps à la maintenance pour intervenir, que le service de maintenance intervienne aux bons moments pour l'entretien préventif et réagisse rapidement aux défaillances des machines.

La majorité des études qui s'intéresse à l'ordonnancement de la production se place dans un environnement déterministe et suppose la disponibilité totale des ressources. Cependant dans la réalité généralement ce n'est pas le cas. En effet, les ressources matérielles et humaines peuvent être indisponibles pour différentes raisons. Comme par exemple les pannes machines ou les opérations de maintenance préventive mises en place par le service maintenance.

Lorsque le responsable de la maintenance demande à immobiliser une ressource pour effectuer une opération de maintenance préventive, cela est généralement ressenti par les responsables de la production comme une perturbation supplémentaire et forcément malvenue. Cet arrêt de la machine a généralement été planifié séparément des tâches de production et ne s'insère que très rarement dans un créneau horaire où elle ne nuirait pas à la productivité. Cependant, les interventions de maintenance préventive ont un rôle prépondérant, puisqu'elles permettent au système de production de fonctionner de façon nominale. En effet, le coût engendré par une panne (impliquant une maintenance corrective, un arrêt non programmé de la production, des retards conséquents de livraison, etc.) est largement supérieur à celui d'un arrêt prévu de la production.

Les figures 3.1, 3.2 et 3.3 montrent bien que l'ordonnement des activités de maintenance, à intervalles donnés, peut gêner l'ordonnement des opérations de production, mais elle est nécessaire pour garantir la disponibilité de l'outil de production.

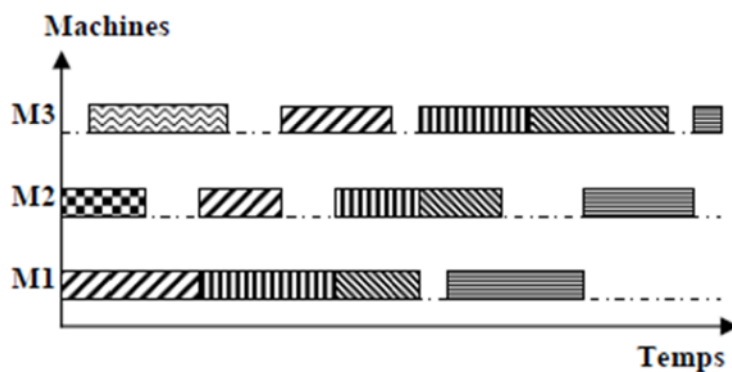


Figure 3.1 Ordonnement de la production.

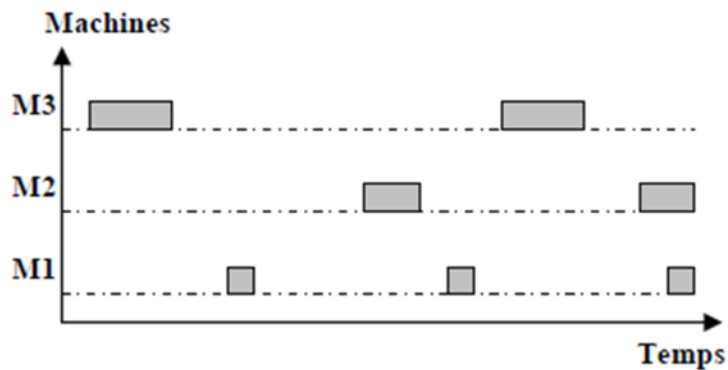


Figure 3.2 Planification de la maintenance.

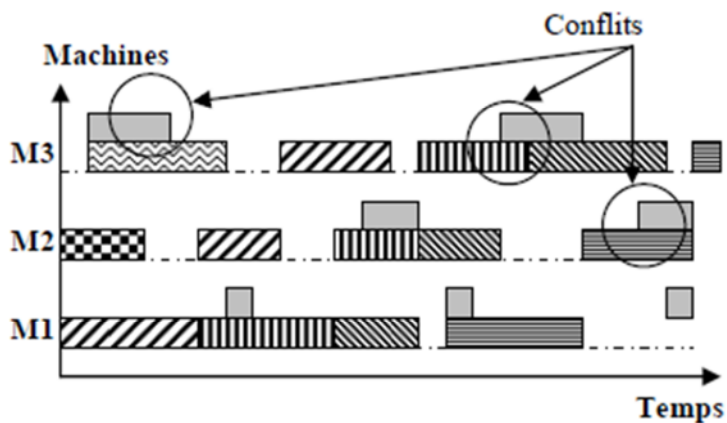


Figure 3.3 Conflits entre Maintenance et Production dans un ordonnancement séparé.



### III.1.2 La politique d'ordonnancement conjoint Production / Maintenance

L'objectif de l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance est de planifier l'exécution des tâches de maintenance, en altérant le moins possible le plan de production, et tout en respectant au mieux la périodicité de maintenance des équipements. Trois politiques de planification ont été recensées dans la littérature, l'ordonnancement séparé, le séquentiel et l'intégré [Lee C, 2000].

- **ordonnancement séparé:** Actuellement la maintenance et la production sont le plus souvent traitées de manière indépendante au sein de l'entreprise. Les ordonnancements correspondants à ces deux activités sont donc réalisés de manière séparée et interfèrent bien souvent l'un avec l'autre entraînant des retards de la production ou de la maintenance. Cette méthode implique la mise en place d'une communication accrue entre les services de production et de maintenance pour limiter les conflits dans l'immobilisation des ressources aussi bien humaines que matérielles;

- **ordonnancement séquentiel:** Cette politique consiste à planifier l'une des deux activités, production ou maintenance, et à utiliser cet ordonnancement comme une contrainte supplémentaire d'indisponibilité des ressources dans la résolution du problème d'ordonnancement de l'ensemble des deux types de tâches. De manière générale, la maintenance est planifiée en premier, ensuite l'ordonnancement de la production est réalisé en prenant les opérations de maintenance comme des contraintes fortes d'indisponibilité des ressources.

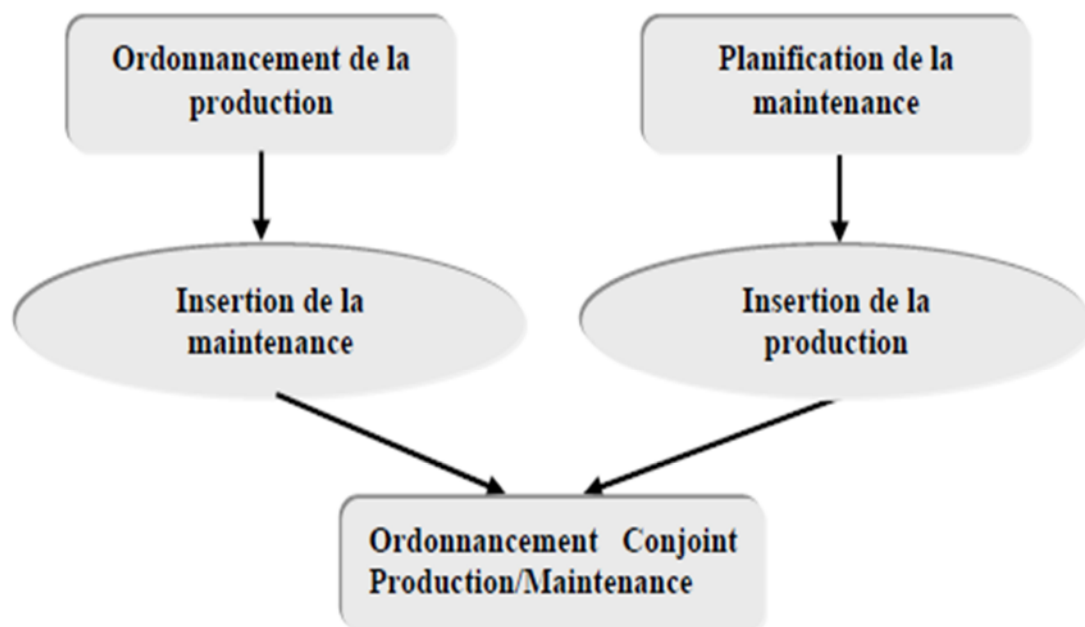
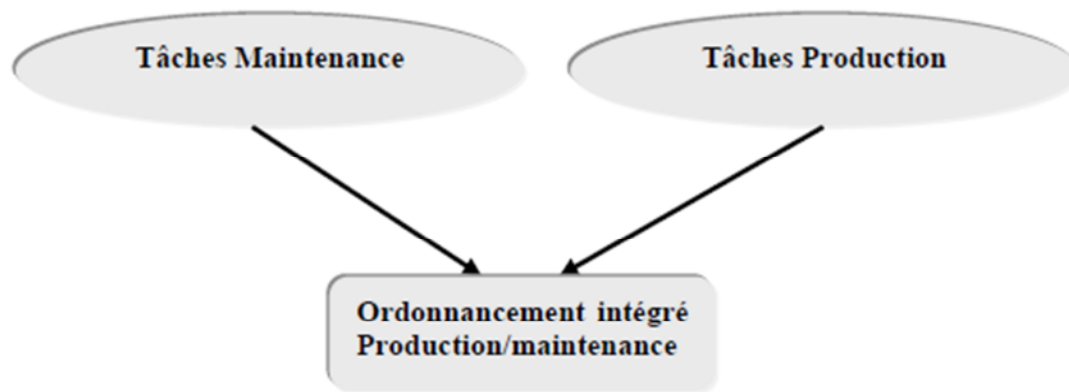


Figure 3.4 Ordonnancement Séquentiel

- **ordonnement intégré**: Cette politique consiste à créer un ordonnancement conjoint et simultané des tâches de production et de maintenance. Une telle politique de planification limite les risques d'interférence entre la production et la maintenance et permet ainsi d'optimiser la qualité des ordonnancements. Cependant, cette politique n'est actuellement qu'au stade de recherche et de test, vu la différence de caractérisation des tâches de maintenance et de production.



**Figure 3.5** Ordonnement Intégré

L'ordonnement conjoint de la production et de la maintenance n'a attiré que récemment l'attention des chercheurs. Un état de l'art sur ces travaux sera présenté dans la section suivante.

### III.2 Etat de l'art

La majeure partie de la littérature dédiée aux problèmes d'ordonnement se place dans le contexte où les ressources nécessaires à l'exécution des tâches sont disponibles en permanence. Cette hypothèse n'est pourtant pas fidèle à la réalité des entreprises. En effet, les différentes ressources qu'elles soient humaines ou matérielles peuvent, pour diverses raisons, être indisponibles. Les indisponibilités des ressources peuvent être dues à une opération de maintenance sur les machines de l'atelier ou à des emplois du temps du personnel. Nous supposons dans cette étude qu'une indisponibilité est due à une opération de maintenance préventive systématique. Ces travaux ne considèrent que les opérations de production, et optimisent un critère bien précis.

Pour la littérature consacrée au problème de l'ordonnement de la maintenance, elle est relativement peu fournie. Les travaux dans le domaine sont principalement orientés vers le choix de stratégies de maintenance et peu d'auteurs abordent les problèmes organisationnels et fonctionnels qui sont pourtant essentiels.

Le fait que la maintenance prenne de l'importance au sein de l'entreprise a suscité d'autres recherches qui tiennent compte des opérations de maintenance, au cours de la résolution du problème d'ordonnement posé. Les travaux qui abordent les relations entre la production et la maintenance sont le plus souvent des études de cas très particuliers.

Les travaux de recherche tenant en compte l'indisponibilité des machines dans l'ordonnement de la production peuvent être classés en deux catégories: l'approche

déterministe et l'approche stochastique. Dans l'approche déterministe, les intervalles de temps des actions de maintenance préventive ainsi que leur nombre sont connus et fixés à l'avance.

La majorité de la littérature d'ordonnement avec maintenance adoptent cette approche souvent appelée "ordonnement avec contraintes de disponibilité des machines". Toutes les configurations d'ateliers connus ont été étudiées par les chercheurs : une seule machine, machines parallèles, *Flow-Shop*, *Job-Shop*, *Open-Shop* et les systèmes hybrides.

Dans le cas de la maintenance préventive, l'objectif est de réaliser l'ordonnement des tâches de maintenance. Pour ce faire, différentes politiques de planification peuvent être mises en place. Certains auteurs proposent de réaliser les tâches de maintenance au cours d'arrêts des machines programmés pour d'autres activités (les inspections de contrôle de la qualité par exemple) [Anily,1999]; [Ben-D,1998]; [Chareonsuk,1997]; [Tsai,2001]; [Benbouzid,2008].

D'autres auteurs se positionnent au niveau de la planification et déterminent un planning des opérations de maintenance et de production, sans se préoccuper des conflits qui risquent d'apparaître. Les derniers, enfin, traitent des problèmes d'ordonnement au sens propre relatif à une machine, à des machines parallèles et au *flow shop*. Ils construisent un ordonnement respectant toutes les contraintes et optimisant un critère donné. Par contre, ils ne s'intéressent pas forcément au même niveau de décision ni aux décideurs et encore moins à l'interactivité qui existe entre eux [Benbouzid,2008], Dans le tableau 3.1, nous présentons un état de l'art non exhaustif sur ces travaux.

	Problèmes d'ordonnement			
	Problème à une machine	Problème à machines parallèles	Flow shop à deux machines	Flow shop à plusieurs machines
Maintenance préventive	[Qi,1999] [Graves,1999]	[Brandolese,1996] [Chareonsuk,1997] [Lee C,2000]	[Espinouse,2001]	[Sanmarti,1997] [Aggoune,2002]

**Tableau 3.1** Classification des articles de maintenance préventive en fonction du type de problème d'ordonnement.

Notre travail dans ce mémoire entre dans le cadre de résolution de problème d'ordonnement conjoint production/maintenance dans les ateliers Flow Shop de permutations pour ce là nous avons choisi un système réel qui existe au niveau de laboratoire MELT (MANUFACTURING ENGINEERING LABORATORY OF TLEMCEN) où nous allons appliquer notre méthode de résolution. La section suivante donne une présentation générale de ce système.

### III.3.3 Le Système MPS500

Le système MPS500 c'est un système de production pédagogique de type flow shop qui est installé dans le laboratoire de productique de Tlemcen MELT (MANUFACTURING ENGINEERING LABORATORY OF TLEMCEN), ce système est constitué de six stations différentes :

- **Une station de distribution** : c'est la première station dans le système, son objectif est la distribution de la matière première (des bouchons) aux autres stations. Le transport de ces bouchons est assuré à l'aide des plates positionnées sur tapis roulant. Les bouchons sont de trois types (rouge, noire et métallique).



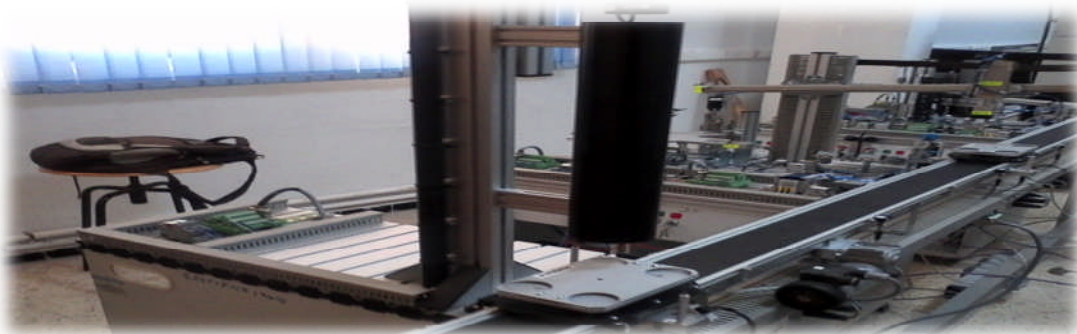
**Figure 3.6** La station « distribution + test » de MPS500

- **Une station de traitement** : c'est la deuxième station dans la chaîne, elle est composée de deux parties, la première partie assurant, à l'aide d'un bras, le déplacement des pièces du tapis vers la deuxième et l'inverse. Le rôle de la deuxième partie est l'usinage de ces pièces.



**Figure 3.7** La station « prélèvement + traitement » de MPS500

- **Une station de contrôle** : cette station est représentée par une caméra qui fait le contrôle des pièces pour vérifier le positionnement de la pièce dans la palette, l'état de cette pièce et sa couleur pour envoyer des informations vers la station suivante.



**Figure 3.8** La station « contrôle » de MPS500



- **Une station de montage (robot) :** c'est une station qui fait le montage des pièces arrivées de la troisième station, ce montage est effectué à l'aide d'un robot qui assure le couplage des pièces avec un ressort et un couvercle, pour être considérées comme produit fini.



**Figure 3.9** La station « montage + robot » de MPS500

- **Une station de stockage et déstockage :** c'est une station qui sert à stocker et délivrer les produits finis vers la dernière station pour le triage et la livraison.

- **Une station de livraison :** c'est la dernière station dans la chaîne de production, son rôle est le triage des pièces (rouge, noir et métallique) pour les préparer à la livraison.



**Figure 3.10** La station « livraison » de MPS500

Dans notre étude, nous avons éliminé la cinquième station du système MPS500 (la station de stockage et déstockage) parce que dans le cas de notre étude cette station n'a aucun impact sur le processus de production. Donc, nous avons considéré que notre système est composé seulement de cinq stations. Notre problème devient donc un problème Flow shop de permutation avec cinq machines.

**Conclusion :**

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre la situation conflictuelle entre l'ordonnement de la production et de la maintenance puis la spécificité de l'ordonnement de la maintenance par rapport à l'ordonnement de production ainsi que son importance au sein de l'entreprise. Dans la seconde partie, nous avons présenté un état de l'art sur les différents travaux réalisés dans ce domaine. La majorité des travaux qui ont traité le problème de l'ordonnement avec prise en compte des indisponibilités des machines ne considèrent pas que ces indisponibilités soient dues à des interventions de maintenance. Peu de travaux se sont intéressés à la maintenance.

De cette étude bibliographique nous avons dégagé les orientations à donner à notre travail. Ces choix sont guidés par le manque de références dans certains axes abordés dans cette recherche bibliographique ainsi que de travaux de synthèse dans le domaine. Ces orientations sont traduites en termes de type d'atelier, de politique de maintenance ainsi que de stratégie de résolution à adopter. Le problème consiste alors à trouver un ordonnement conjoint des tâches de maintenance et de production, qui respecte au mieux les contraintes du problème, et cela par l'adaptation des algorithmes génétiques pour l'ordonnement de la production pour ce type de problème.

Nous présenterons donc dans le chapitre suivant l'adaptation des algorithmes génétiques choisies ainsi que les résultats obtenus.

# **Chapitre IV**

**Optimisation par les  
algorithmes génétiques**

## Introduction

Les Algorithmes Génétiques (AGs) sont certainement la branche des algorithmes évolutionnaires la plus connue et la plus utilisée. Ils ont été créés par analogie avec des phénomènes naturels. Dans ce cas, il s'agit de simuler l'évolution naturelle d'organismes (individus), génération après génération, en respectant des phénomènes d'hérédité et une loi de survie. Dans une population d'individus, ce sont en général les plus forts, c'est à dire les mieux adaptés au milieu, qui survivent et donnent une descendance. Par ailleurs, on suppose que les qualités et les défauts peuvent être hérités des parents de manière stochastique.

Après une description générale des méthodes de résolutions des problèmes d'ordonnancement dans le premier chapitre, nous allons présenter dans ce chapitre une description de problème d'ordonnancement dans un atelier flow shop strictement non-préemptif ou les machines sont sujettes à des interventions périodiques de maintenance préventive systématique, le principe de l'algorithme génétique en détails, ensuite, les différentes phases de cet algorithme. Nous présenterons une mise en œuvre d'un algorithme génétique pour la résolution de ce problème, nous terminons par une série de tests pour évaluer la méthode de résolution proposée et l'application de cette méthode sur le système MPS500.



## IV.1 Problème d'atelier de type flow shop

Nous nous intéressons dans notre étude aux ateliers de type flow shop notés  $F_n//C_{max}$ . Ce type d'atelier se rencontre très fréquemment en pratique. Nous nous restreindrons au cas dans lequel l'ordre de passage des jobs sur les machines est le même pour tous les jobs. Ce problème est connu sous le nom de flow shop de permutations.

Nous étudions dans ce chapitre le problème d'ordonnement dans un atelier flow shop strictement non-préemptif ou les machines sont sujettes à des interventions périodiques de maintenance préventive systématique. Nous supposons que les périodes de maintenance sont connues et flexibles. L'objectif est la minimisation d'une fonction tenant compte des deux aspects production et maintenance.

### IV.1.1 Notations et Hypothèses

Pour formuler le problème d'ordonnement conjoint de la production et de la maintenance dans un atelier de type flow shop, nous allons utiliser les notations données au tableau 4.1. Ces notations nous permettront de définir et formuler le critère d'optimisation lié à la production et à la maintenance.

Le problème d'ordonnement de type flow shop strictement non-préemptif avec la prise en compte de périodes de maintenance des machines se définit de la manière suivante :

- Un ensemble de  $n$  travaux  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  doit être réalisé sur  $m$  machines  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ ;
- Chaque travail  $J_i$ , compose d'une séquence de  $m$  opérations  $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im}\}$ , visite toutes les machines dans l'ordre  $(M_1, M_2, \dots, M_m)$  ;
- chaque machine ne peut réaliser qu'une seule opération à la fois et chaque opération nécessite une seule machine à la fois;
- Les machines sont sujettes à plusieurs types de maintenance et a des périodes différentes. Une gamme de maintenance sera fixée a priori;
- Les opérations sont strictement non-préemptives, ce qui signifie que l'exécution de toute opération ne peut être interrompue ni par la réalisation d'une intervention de maintenance, ni par celle d'une autre opération.

Afin d'optimiser le placement des tâches de maintenance, nous supposons qu'elles sont flexibles et que leurs dates de début doivent être déterminées durant la procédure d'ordonnement. Une fenêtre temporelle est donc allouée à l'exécution de chaque tâche. Cette hypothèse se rapproche d'ailleurs de la réalité industrielle, telle que par exemple l'obligation de planifier une tâche de maintenance sur une machine toutes les 10 heures de

travail plus ou moins 1 heure. En plus, il est raisonnable de penser que si une machine est libre à un moment donné et si une tâche de maintenance peut s'effectuer à ce moment, il peut être plus intéressant de la réaliser aussitôt que possible, de manière à poursuivre avec une machine dont la probabilité de panne est plus faible. Nous supposons que le nombre de tâches de maintenance est une seule intervention de maintenance préventive pour chaque machine, et il existe une seule équipe d'intervention, donc, c'est impossible d'effectuer deux interventions de maintenance au même temps sur deux machines pour cela nous supposons qu'il existe un intervalle de temps entre deux maintenances successives.

Nous considérons les tâches de maintenance comme les tâches de production avec des contraintes supplémentaires (les dates de disponibilité, l'intervalle de temps entre deux interventions ...).

symbole	Signification
$P_{ij}$	Le temps opératoire de la tâche $J_i$ sur la machine $M_j$
$P[i] j$	Le temps opératoire du travail ordonnancé en position $i$ sur la machine $M_j$
$C_{ij}$	La date d'achèvement du travail $J_i$ sur la machine $M_j$
$C[i] j$	La date d'achèvement du travail ordonnancé en position $i$ sur la machine $M_j$
$S_{ij}$	Le temps où un travail $J_i$ est ordonnancé
$P_s$	Le temps nécessaire pour que la première tâche de maintenance soit disponible
$V$	L'intervalle du temps entre deux maintenances successives

**Tableau 4.1** Notations utilisées

### IV.1.2 La fonction objectif

Le but est de proposer une méthode qui fournit un planning commun pour les tâches de production et de maintenance. L'objectif de l'optimisation consiste en un compromis entre la fonction objectif que l'on souhaite atteindre pour la production et la maintenance.

Les contraintes imposées par les clients à leurs fournisseurs s'expriment souvent en terme de délai, ce qui nous fait naturellement nous tourner vers la minimisation du temps total de fabrication (en anglais *makespan* ou  $C_{max}$ ). Cette fonction objectif qui peut s'exprimer par:

«Pour chaque tâche  $J_{ij}$  ordonnancée à un temps  $S_{ij}$ , la fonctions objectif peut être calculée comme suit:

$$C_{max} = \max_{i \in \{1 \dots M\}} [S_{iM} + P_{iM}]$$

### IV.1.3 Méthode de résolution

Comme nous avons présenté dans le premier chapitre, il existe plusieurs méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement.

Les algorithmes génétiques sont connus pour leur capacité à fournir de bonnes solutions aux problèmes d'optimisation combinatoire NP-difficiles, en un temps relativement court. En particulier, ils ont prouvé leur efficacité dans la résolution de problèmes d'ordonnancement d'ateliers, notamment celui du Flow Shop. Pour la résolution du problème d'ordonnancement de la production et de la maintenance dans un flow shop a plusieurs machines, nous allons proposer un algorithme génétique. Nous détaillons par la suite les éléments de l'algorithme génétique mis en œuvre.

#### IV.1.3.1 les algorithmes génétiques

Les Algorithmes Génétiques (AGs) sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées, et les échanges d'informations aléatoires, parfois guidées, pour former un algorithme d'exploration qui possède certaines des caractéristiques de l'exploration humaine [Goldberg,1994]. Ils ont été développés par John Holland [Holland,1975] à l'Université de Michigan avec deux objectifs à atteindre:

- mettre en évidence et expliquer rigoureusement les processus d'adaptation des systèmes naturels,
- concevoir des systèmes artificiels (en l'occurrence des logiciels) qui possèdent les propriétés importantes des systèmes naturels.

Caractérisés par leur propre théorie et structure, les AGs se sont différenciés des autres méthodes d'optimisation traditionnelles par leur mode d'action. Un AG modélise le processus d'évolution collectif d'une population d'individus pour s'adapter à un environnement [Mesghouni,1999]. Chaque individu va, non seulement représenter un point de l'espace des solutions du problème, mais aussi contenir la connaissance actuelle de l'individu par rapport à l'environnement. La recherche sur les AGs a pour souci principal l'amélioration de la robustesse, l'équilibre entre la performance et le coût nécessaire à la survie dans des environnements nombreux et différents. Ayant été reconnus comme une approche valide des problèmes nécessitant une exploration performante et économique du point de vue du calcul, les algorithmes génétiques sont maintenant appliqués dans de nombreux domaines : l'ingénierie, la distribution (le problème de voyageur de commerce), *l'ordonnancement*, la logistique et la recherche scientifique en optimisation en général.

### ⇒ Principe général des algorithmes génétiques

Les AGs constituent une classe de stratégies de recherche réalisant un compromis entre l'exploration et l'exploitation. Ils représentent des méthodes qui utilisent un choix aléatoire comme outil pour guider une exploration hautement intelligente dans l'espace des paramètres codés [Mesghouni,1999].

Ce sont des algorithmes itératifs de recherche globale dont l'objectif est d'optimiser une fonction prédéfinie, appelée fonction coût ou fonction *fitness*. Les algorithmes génétiques emploient un vocabulaire emprunté à la génétique naturelle. Ils travaillent sur un ensemble d'individus appelé *population*. Un individu a deux représentations, appelées *phénotype* et *génotype*. Le phénotype représente une solution potentielle du problème à optimiser en utilisant la formulation originale du problème. Le génotype donne une représentation codée d'une solution potentielle sous la forme d'un *chromosome*. Un chromosome est formé de *gènes* disposés en une succession linéaire et chaque gène peut prendre plusieurs valeurs appelées *allèles*.

Un des points les plus importants des algorithmes génétiques est la flexibilité dans la fonction objective.

Un AG peut être considérée à la base comme un processus aléatoire. Cependant, les informations qui viennent de fonctions objectives sont toujours utilisées pour paramétrer ce processus.

Le travail de recherche commence en plusieurs points dans l'espace des solutions, c'est-à-dire sur une population de points et non pas en un point singulier comme dans la plupart des techniques d'optimisation [Vacher,2000].

### ⇒ Les AGs dans les ateliers flow shop

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la résolution des problèmes d'ordonnancement pour les ateliers de type flow-shop [Boukef,2006]. Dans son article intitulé «A Genetic Algorithm with Sub-indexed Partitioning genes and its application to production scheduling of parallel machines », [Jou05], propose un algorithme génétique dont le codage des gènes est basé sur une indexation dépendante de la génération (GASP). L'ordonnancement cherche la combinaison optimale entre le temps de fabrication le plus court et du temps d'attente minimum des machines. Puisque le problème en général est NP-difficile, les solutions d'ordonnancement obtenues sont pseudo optimales pour des machines du flow-shop parallèle. Cet algorithme a été appliqué pour un système de production dans le domaine électronique. Il a montré que les solutions de GASP sont meilleures que celles des règles heuristiques. Lee et al. considèrent les jobs avec des contraintes de précedence dans l'ordonnancement. Leur

fonction «fitness » inclus les paramètres : dates de fin des jobs et coût de l'approvisionnement. Ils proposent également une technique de recherche basée sur un algorithme génétique. Cette technique est adoptée dans un système de production du type flow-shop, pour fournir la combinaison optimale ou pseudo-optimale des séquences de production, en considérant les ressources utilisées, et en minimisant le makespan tout en respectant les contraintes de ressources et de la production [Tangour,2007].

---

**Algorithme 4.1** Algorithme génétique en générale

---

Initialisation : soit  $X(0) \subseteq X$ , une population initiale ;

Etape n : soit  $X(n) \subseteq X$ , la population courante ;

- sélectionner dans  $X(n)$  un ensemble de paires de solutions de haute qualité ;
- appliquer à chacune des paires de solutions sélectionnées un opérateur de croisement qui produit une ou plusieurs solutions " enfants ".
- remplacer une partie de  $X(n)$  formée de solutions de basse qualité par des solutions enfants de haute qualité ;
- appliquer un opérateur de mutation aux solutions ainsi obtenues ;

Les solutions éventuellement mutées constituent la population  $X(n+1)$  ;

Si la règle d'arrêt est satisfaite, stop ;

Sinon, passer à l'étape  $n + 1$ .

---

Pour mettre en œuvre un algorithme génétique, il est nécessaire de disposer :

- Une représentation génétique du problème, c'est-à-dire un codage de solutions utilisé sous la forme de chromosomes.
- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme est indispensable de construire une population d'individus non homogène.
- Une fonction qui permet d'évaluer l'adaptation d'un chromosome à son environnement, ce qui offre la possibilité de comparer des individus. Cette fonction est construite à partir du critère que l'on désire optimiser. L'application de cette fonction à un élément de la population donne sa *fitness*.
- Un mode de sélection des chromosomes à reproduire. Cette sélection est basée sur la reproduction et sur le codage génétique, qui stocke les informations décrivant l'individu sous forme de gènes.

- D'opérateurs de croisement et de mutation permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état.
- de paramètres qu'utilise l'algorithme : taille de la population, probabilité de croisement et de mutation, nombre total de générations.

---

**Algorithme 4.2** L'algorithme génétique pour le cas étudié
 

---

- Initialiser :  $pop, jobs, prc\_crois, prc\_mut, nbre\_iter, ps, v$
  - Générer une population aléatoirement séquences de  $jobs$
  - L'évaluation : Évaluer tous les chromosomes par la fonction d'évaluation
  - Le classement : Ranger les chromosomes dans l'ordre croissant selon leur fonction d'évaluation
- pour** ( $i=1; i < nombre\ d'itération ; i++$ )
- La sélection : par une probabilité  $prc\_crois$
  - Le croisement : Croisement des parents pour obtenir des enfants (et corrigé les doubles)
  - La mutation : Muter les enfants par une probabilité  $prc\_mut$
  - L'évaluation : Évaluer tous les chromosomes par la fonction d'évaluation
  - Le classement : Ranger les chromosomes dans l'ordre croissant selon leur fonction d'évaluation
- comparé le min et enregistré le plus petit ( $n=x ; si(y>x)n=y$ )

**Fin pour**

---

### IV.1.3.2 Codage des solutions

Comme notre atelier est de type *flow shop* de permutation, Le codage choisi pour la représentation d'un ordonnancement est le codage de permutation, où chaque solution est un vecteur (séquence) de tâches de taille  $n$  ( $n$  nombre de tâches).

Ce type de codage est parfaitement adapté à notre problème puisque une solution représente la séquence de passage de toutes les tâches de production, sur la totalité des machines.

On notera par  $S [i]=j$  la tâche numéro  $j$  qui sera exécutée au  $i^{ième}$  case dans la séquence  $S$ .

**Exemple :**

Pour 7 tâches de production, une solution peut être la séquence suivante:

Séquence S

2	7	5	4	6	1	3
---	---	---	---	---	---	---

S [3] = 5; S [6] = 1; etc...

**IV.1.3.3 Génération de la population initiale**

Pour démarrer un algorithme génétique, il faut lui fournir une population à faire évoluer. La manière dont le programmeur va créer chacun des individus de cette population est entièrement libre. Il suffit que tous les individus créés soient de la forme d'une solution potentielle, et il n'est nullement besoin de songer à créer des bons individus. Ils doivent juste rentrer dans le 'moule' du problème posé.

Il est tout à fait possible de créer les individus de manière aléatoire. Et cette méthode amène un concept très utile dans les algorithmes génétiques : la diversité. Plus les individus de la population de départ seront différents les uns des autres, plus nous aurons de chance d'y trouver, non pas la solution parfaite, mais de quoi fabriquer les meilleures solutions possibles.

**Algorithme 4.3** Algorithme de Procédure de génération

**Pour** i = 1 à taille\_pop **faire**

X ← chromo\_vide

**Tant que** (x non rempli)

T ← 0

**Tant que** ( T < ps )

Sélectionner aléatoirement job

T ← T + période ( 1<sup>er</sup> tâche de job)

Ajouter ( chromo,job )

**Fin tant que**

**Fin tant que**

ajouter (pop,x)

#### IV.1.3.4 L'opérateur de sélection

La sélection est un processus dans lequel des individus dans une population sont choisis selon les valeurs de leurs fonctions coût ou « fitness » pour former une nouvelle population. Les individus *évoluent* par des itérations successives de reproduction et de sélection, appelées *générations*. Chaque individu est sélectionné proportionnellement à sa fonction « fitness », donc, un individu avec une fonction « fitness » plus élevée aura plus de chance d'être sélectionné qu'un autre avec une valeur de « fitness » inférieure. Cette fonction peut être envisagée comme une mesure de profit ou de qualité qu'on souhaite maximiser. Un opérateur simple de sélection est la technique de la roulette pondérée où chaque individu d'une population occupe une surface de la roulette proportionnelle à sa valeur de la fonction « fitness ». Pour la reproduction, les candidats sont sélectionnés avec une probabilité proportionnelle à leurs « fitness ». Pour chaque sélection d'un individu, une simple rotation de la roue donne le candidat sélectionné. Cependant cette sélection n'est pas parfaite. En effet le risque de favoriser un individu ou un petit ensemble d'individus constitue un inconvénient qui risque d'appauvrir la diversité de la population.

Dans notre cas la fonction et de minimisé le Makespan « Cmax » et le chromosome indique le séquençement des tâches, on considère que les tâches de maintenance aussi mais avec des conditions :

- Le temps nécessaire pour que la première tâche de maintenance soit disponible  $V$  ;
- L'intervalle du temps entre deux maintenances successives  $P_s$ .

---

#### Algorithme 4.4 Algorithme de Procédure de sélection

---

```

Bon ← 1er partie pop_actuel ;
Mauvais ← 2eme partie pop_actuel ;
Nouvelle_pop ← {} ;
Permuté ( prec_crois , bon , mauvais ) ;
Tant que bon ≠ {} faire
    Sélection aléatoire ( x,y,bon ) ;
    Ajouté ( x,y,nouvelle_pop ) ;
    Supprimer (x,y,bon) ;
Fin tant que
Tant que mauvais ≠ {} faire
    Sélection aléatoire ( x,y,mauvais ) ;
    Ajouté ( x,y,nouvelle_pop ) ;
    Supprimer (x,y,mauvais) ;
Fin tant que
Retourner ( nouvelle_pop ) ;

```

---



### IV.1.3.5 L'opérateur de croisement

Le croisement est un opérateur de recombinaison. Les individus dans une population sont couplés au hasard par paires qui représentent les parents. Chaque paire d'individu subit le croisement, opérant sur les génotypes (c'est-à-dire chromosomes) de deux individus appelés parents. Il produit de nouveaux individus appelés enfants dont les gènes sont hérités de l'un ou/et de l'autre parent.

Ceci peut être fait en dédoublant chacun des deux chromosomes dans des fragments et les recombinants pour former de nouveaux chromosomes.

#### ⇒ Le croisement à un point

Le croisement à un point place un point de croisement au hasard, dans le cas où le génotype est une chaîne binaire de longueur  $n$ . Un enfant prend une section avant le point de croisement d'un parent et prend l'autre section après le point de croisement de l'autre parent puis recombine les deux sections pour former une nouvelle chaîne binaire. L'autre enfant se construit de façon inverse.

#### *Exemple*

Considérons  $P1$  et  $P2$  deux chaînes binaires de longueur  $n = 7$  correspondant aux parents:

$$P1 = 0000 | 001$$

$$P2 = 1111 | 110$$

Le symbole  $|$  indique un point de croisement, et dans ce cas il est placé après le quatrième bit. Le croisement à un point crée les deux nouveaux individus  $E1$  et  $E2$  comme suit:

$$E1 = 0000 | 110$$

$$E2 = 1111 | 001$$

#### ⇒ Le croisement à deux points

Le croisement à deux points place deux points de croisement au hasard, et prend une section entre les points d'un parent et les autres sections en dehors des points de l'autre parent puis les recombine. Dans l'exemple suivant, les deux points de croisement sont placés respectivement après le premier et quatrième bit.

$$P1 = 0 | 000 | 001$$

$$P2 = 1 | 111 | 110$$

Le croisement à deux points résultant conduit aux deux individus suivants :

$$E1 = 0|111|001$$

$$E2 = 1|000|110$$

Dans le cas de notre étude nous avons choisi le croisement à un point au centre du chromosome et avec un pourcentage de sélection ( $prc\_crois = 80\%$ ) à partir de la bonne classe.

Mais il y a un problème de cases doublées

**Exemple :**

$$P1 = 34789|6521$$

$$P2 = 36987|4521$$

Après le croisement:

$$E1 = 34789|4521$$

$$E2 = 36987|6521$$

Donc, voilà le problème de répétition des cases et de manque des autres cases. Pour résoudre ce problème nous avons introduire une fonction qui détecte la répétition et la corriger, le résultat dans notre exemple est comme suit :

Elle supprime la tâche répétée, et la remplacer avec la case manquée.

$$E1 = 34789|[ ]521$$

$$E2 = 36987|[ ]521$$

$$\underline{E1 = 34789|6521}$$

$$\underline{E2 = 36987|4521}$$

---

#### Algorithme 4.5 Algorithme de Procédure de croisement

---

**Pour**  $i = 1$  à taille (pop) ; pas = 2

**Pour**  $j = 1$  à taille\_cromo /2 faire

        Pop[i] [j]  $\leftrightarrow$  pop [i+1] [j];

**Fin pour**

**Fin pour**

Elimination \_ double (pop);

---

### IV.1.3.6 L'opérateur de mutation

La mutation opère sur le génotype d'un seul individu. Elle correspond à une « erreur » produite quand le chromosome est copié et reproduit ; c'est-à-dire, pour une chaîne binaire, elle consiste, par exemple, à faire pour un allèle un échange.

Si des copies exactes sont toujours garanties, alors le taux de mutation est égal à zéro. Cependant, dans la vie réelle, l'erreur de copie peut se produire dans des circonstances spécifiques comme la présence du bruit. La mutation change des valeurs de certains gènes avec une faible probabilité. Elle n'améliore pas, en général, les solutions mais évite une perte irréparable de la diversité.

#### *Exemple*

$A = 10000$  (avant mutation)

$A' = 10100$  (après mutation)

Dans cet exemple il y a un échange entre le 0 et le 1 du troisième bit de l'individu A pour obtenir l'individu A'.

Dans le cas de notre étude nous avons choisi une case et nous l'avons changé avec une autre case, cette opération est appliqué sur un pourcentage ( $prc\_mut = 10\%$ ) de chromosomes.

---

#### **Algorithme 4.6** Algorithme de Procédure de mutation

---

List\_chois  $\leftarrow$  {}

**Pour**  $i = 1$  à pourcentage \_ mutation ;

$n \leftarrow$  générer entier entre ( 1 et taille pop n'appartienne pas list\_chois ) ;

  ajoute ( x , list\_chois ) ;

$pop[x][e] \leftrightarrow pop[x][m]$  ;

**Fin pour**

---

### IV.1.4 Test et validation :

⇒ *Les problèmes de petite taille :*

#### *Exemples :*

Nous avons fait des exemples avec une loi uniforme  $M [1..3]$ ,  $J [1..4]$ .

- Chaque machine est concernée par un seul type de maintenance ;

- Il existe une seule équipe d'intervention, donc, c'est impossible d'effectuer deux interventions de maintenance au même temps sur deux machines pour cela nous supposons qu'il existe un intervalle de temps entre deux maintenances successives  $P_s$ ;
- Nous proposons qu'il y'a une préparation des machines avant le lancement de la production, donc, il existe un temps nécessaire pour que la première tâche de maintenance soit disponible  $V$ .

**Exemple 1:**

$$P_s = 8 / V = 15$$

	<b>J1</b>	<b>J2</b>	<b>J3</b>	<b>J4</b>	<b>Maint</b>
<b>M1</b>	5	4	7	8	2

**Exemple 2:**

$$P_s = 10 / V = 10$$

	<b>J1</b>	<b>J2</b>	<b>Maint</b>
<b>M1</b>	5	3	1
<b>M2</b>	8	2	2
<b>M3</b>	4	10	1.5

**Exemple 3:**

$$P_s = 20 / V = 15$$

	<b>J1</b>	<b>J2</b>	<b>J3</b>	<b>Maint</b>
<b>M1</b>	12	20	11	2
<b>M2</b>	17	8	19	2

**Exemple 4:**

$$P_s = 10 / V = 8$$

	<b>J1</b>	<b>J2</b>	<b>J3</b>	<b>J4</b>	<b>Maint</b>
<b>M1</b>	5	6	4	3	1
<b>M2</b>	3	5	4	2	1.5

**Exemple 5:**

$$P_s = 5 / V = 5$$

	J1	J2	J3	Maint
M1	2	3	4	1
M2	4	1	3	0.5
M3	3	2	5	1.5

Les résultats sans maintenance : **C<sub>max</sub>**

	manuel	Avec le programme	L'incertitude	le séquençement manuel / programme	
Ex 1	24	24	100/100	1-2-3-4	1-2-3-4
Ex 2	20	20	100/100	2-1	2-1
Ex 3	55	55	100/100	3-1-2	3-1-2
Ex 4	20	20	100/100	2-3-1-4	2-3-1-4
Ex 5	16	16	100/100	1-3-2	1-3-2

**Tableau 4.2** Les résultats sans maintenance

Les résultats avec la maintenance : **C<sub>max</sub>**

	manuel	Avec le programme	L'incertitude	le séquençement manuel / programme	
Ex 1	26	26	100/100	4-3-2-m1-1	4-3-2-m1-1
Ex 2	22	22	100/100	2-1-m1	2-1-m
Ex 3	57	57	100/100	3-m1-1-2-m2	3-m1-1-2-m2
Ex 4	21	22	95.5/100	4-3-m1-2-m2-1	2-3-m1-1-4-m2
Ex 5	18	18	100/100	1-m2-3-m2-2	1-m2-3-m2-2

**Tableau 4.3** Les résultats avec la maintenance

Après la comparaison des résultats affichés par notre programme avec les résultats optimaux (que nous avons obtenus manuellement avec des méthodes exactes), nous remarquons que les résultats de notre programme sont proches aux résultats exacts avec un pourcentage de 99.55% :

- Dans le cas des résultats sans maintenance, nous avons obtenu les mêmes résultats avec les méthodes exactes dans les cinq exemples. Nous pouvons dire que les résultats sont proches à 100%.
- Dans le cas des résultats avec maintenance, nous avons obtenu les mêmes résultats pour quatre exemples et le cinquième est proche du résultat optimal avec un pourcentage de 95.5%. Donc nous disons que les résultats sont proches à 99.1%.

Ces résultats nous permettent de dire que notre programme est performant pour les problèmes de petite taille. Donc nous pouvons valider notre programme pour ces problèmes.



### IV.1.5 l'application sur MPS500 :

Nous allons appliquer notre modèle pour résoudre le problème d'ordonnement de production / maintenance dans le système MPS500.

Pour appliquer notre méthode dans ce système, nous allons lancer un lot de production avec 10 pièces (3 pièces rouges, 3 pièces noirs, et 4 pièces métalliques), les temps de traitement des types de pièces sont différent dans chaque machine.

Pour la maintenance, nous avons fait des interventions de maintenances préventives systématiques, un seul type de maintenance dans chaque machine.

La fonction objective est toujours le *makspan*  $C_{max}$ .

Nous avons exécuté ce problème dans notre programme avec les contraintes suivantes :

- $P_s = 20$ ,
- $V = 15$ ,
- Le nombre de population initial = 500,
- Le nombre d'itération = 200,
- Le pourcentage de croisement = 80%,
- Le pourcentage de mutation = 10%,
- 10 jobs (3 : rouge ; 3 noir ; 4 métallique),
- 5 tâches de maintenance.

Les temps opératoires des tâches de production et de maintenances sont présentés dans le tableau suivant :

	<b>J1 (rouge)</b>	<b>J2 (noir)</b>	<b>J3 (métallique)</b>	<b>Maintenance</b>
<b>M1</b>	14	14	14	10
<b>M2</b>	41	41	45	8
<b>M3</b>	15	14	12	5
<b>M4</b>	70	73	68	15
<b>M5</b>	32	35	36	12

**Tableau 4.5** Temps opératoires des tâches de production et de maintenance.

Après l'exécution de ce problème dans notre programme, nous avons obtenu les résultats suivants :

La meilleure solution obtenue par notre modèle est  $C_{max} = 814$  .

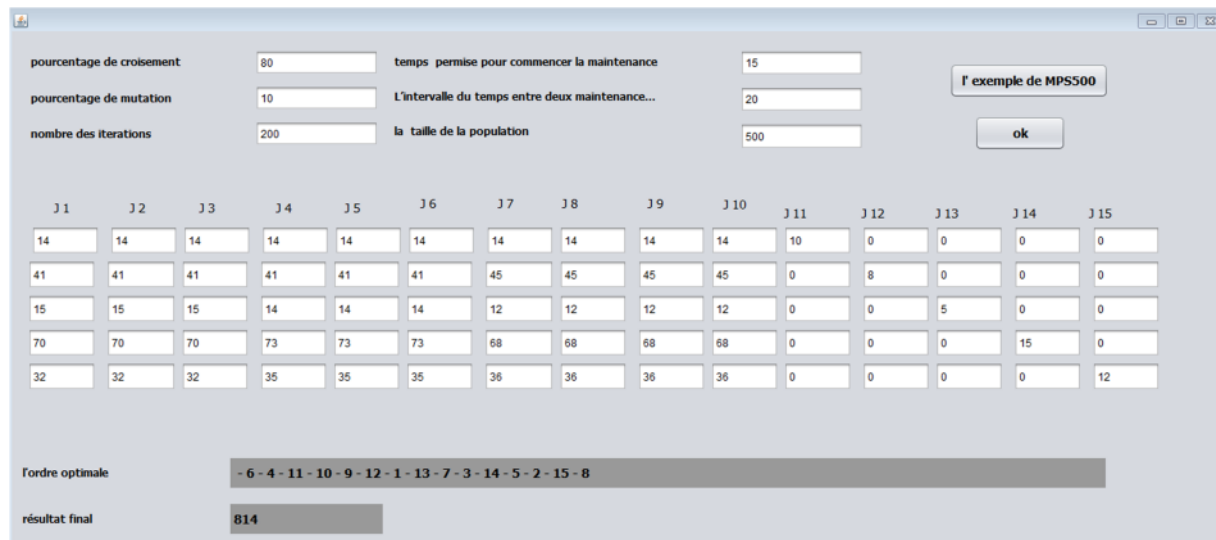


Figure 4.2 l'interface du programme.

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons proposé une méthode d'optimisation pour le cas d'atelier flow shop. L'optimisation considérée a un objectif de minimiser le *Makspan* ( $C_{max}$ ) et l'indisponibilité des machines à la fois afin de trouver un compromis pour le service d'ordonnancement et le service de maintenance. Nos variables de décision sont l'ordre de tâches de production sur les machines et les dates de maintenance préventive systématique de chaque machine. Nous avons alors développé un algorithme génétique où nous avons supposé que les maintenances systématiques sont des tâches avec des contraintes supplémentaires. Des tests ont été menés sur des petites et grandes instances que nous avons générées aléatoirement pour valider notre méthode. Enfin, nous avons réussi de résoudre le conflit entre la production et la maintenance dans le système MPS500.



# **Conclusion Générale**

## *Conclusion générale :*

Le travail développé dans ce mémoire porte sur la problématique de l'ordonnancement des tâches de maintenance. Notre travail a été appliqué sur un atelier de production flow-shop afin d'atteindre l'objectif de l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance est de planifier l'exécution des tâches de maintenance, en altérant le moins possible le « plan » de production, et tout en respectant au mieux la périodicité de maintenance des équipements, et pour minimiser le critère le plus important : la date de fin d'ordonnancement « le  $C_{\max}$  ».

Pour atteindre ces objectifs, l'algorithme « génétique » a été appliqué premièrement sur des exemples bien définis et après sur MPS500. L'étape la plus importante de notre étude a été consacrée, en premier lieu, à tester et vérifier l'algorithme génétique pour l'ordonnancement déterministe au petits instant et sur des benchmarks existants dans la littérature, dont l'objectif est de minimiser seulement la date d'achèvement des jobs (makespan).

Pour la validation du programme on utilisant les petits instants avec les deux cas (avec maintenance / sans maintenance), qui ont donné de bons résultats avec un pourcentage plus proche de 99.1%. Par contre la validation du programme avec les benchmarks a donné des résultats avec un pourcentage de 95.4%.

Après l'application du programme sur les petits et les grands instants, nous pouvons dire que les résultats trouvés nous permettent de de valider notre programme et de l'appliquer sur le système MPS500.

# *Perspectives*

L'étude réalisée dans ce mémoire représente un potentiel considérable vue la relation d'interdépendance entre la stratégie de production et de maintenance ; et son impact sur le processus décisionnel afin d'améliorer la productivité des entreprises et d'assurer la pérennité de leurs systèmes de production.

Ce domaine reste très vaste et dont l'importance ne cesse de croître. Cependant, les systèmes de production sont très complexes et les critères liés à la production sont généralement antagoniste avec ceux de la maintenance, ce qui peut mener à de nouvelles circonstances. Par conséquent, notre travail doit être enrichi en proposant d'autres solutions pratiques dans les domaines suivants :

- Malgré la relation d'interdépendance entre stratégie de production et de maintenance, Nous avons supposé que les deux activités sont généralement planifiées et exécutés séparément ce qui conduit à un conflit dans la prise de décisions. Par conséquent, il est primordial de coordonner les services de la production et ceux de la maintenance afin de minimiser les couts de maintenance et maximiser la productivité de l'entreprise. Dans ce sens, nous devons proposer un modèle intégré qui prend en considération le service de maintenance et celui de production
- Dans cette étude, nous avons ignoré le facteur relatif au taux de dégradation des machines. Pour cela, nous suggérons de considérer le système avec d'autres variantes, tout en essayant d'appliquer d'autres politiques de maintenance sur ce problème
- Les recherches menées se concentrent sur la réduction d'un seul objectif. Cependant, de nombreux objectifs peuvent être bien justifiés dans la pratique qui peuvent être souvent contradictoires pour joindre et optimiser les services de production et de maintenance. Dans ce sens, nous proposons d'utiliser des approches multi-objectif.

- Finalement, la planification de la production est supposée déjà faite, mais, ce même problème peut être identifié dans plusieurs structures, donc, il serait judicieux d'intégrer la maintenance des systèmes de production, la planification et l'ordonnancement de la production dans un seul modèle tout en essayant d'adopter de nouvelles approches génériques.

# Références

- [**Aggoune,2002**] Aggoune R., Ordonnancement d'ateliers sous contraintes de disponibilité des machines. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Metz, France, 2002.
- [**Aliouat W,2013**] Aliouat W, Le problème conjoint de l'ordonnancement de la production et de planification de la maintenance : cas du Flow Shop Flexible, Mémoire de magister de l'Université de Boumerdes, Algérie, 2013.
- [**Anily,1999**] Anily S., Glass C.A. & Hassin R., "Scheduling maintenance services to three machines", Annals of Operations Research, VOL. 86, 1999.
- [**Azem S,2010**] Azem S, Ordonnancement des systèmes flexibles de production sou contraintes de disponibilité des ressources, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2010.
- [**Belkaid F,2014**] Belkaid F, Investigation sur l'ordonnancement des systèmes à machines parallèles, Thèse de Doctorat en Productique de l'Université de Tlemcen, Algérie, 2014
- [**Benbouzid F,2005**] Benbouzid F, Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints production/maintenance –cas du flow shop. Thèse de doctorat en Automatique et Informatique de l'Université de Franche-Comté, France, 2005.
- [**Benbouzid,2008**] Benbouzid Sitayeb F., Contribution \_a l'\_etude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints Production/Maintenance - Cas du Flowshop. Thèse de doctorat, L'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, France, 2008.
- [**Ben-D,1998**] Ben-Daya M. & Makhdoum M., "Integrated production and quality model under various maintenance policies", Journal of the Operational Research Society, VOL. 49(8), 1998.

- [Berrichi A,2009]** Berrichi A, La gestion à deux niveaux avec optimisation de la production et de la maintenance sous diverses contraintes : cas mono et multicritère, Thèse de doctorat de l'Université de Boumerdès, Algérie, 2009.
- [Boukef,2006]** Boukef H., F. Tangour, M. Benrejeb, P. Borne, « Nouveau codage pour la résolution de problèmes d'ordonnancement d'ateliers de type flow-shop par les algorithmes génétiques », STA'06, pp.1-14, 2006.
- [Boulenger,1988]** Boulenger A., Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle, Guides de l'utilisateur, AFNOR, Paris, 1988.
- [Brandolese,1996]** Brandolese M., Fransi M. & Pozzetti A., "Production and maintenance integrated planning", International Journal of Production Research, VOL. 34(7), pp.2059-2075, 1996.
- [Carlier J,1988]** Carlier J, Chretienne P. Les Problèmes d'ordonnancement. Masson, Paris, France, 1988.
- [Chareonsuk,1997]** Chareonsuk C., Nagarur N. & Tabucanon M.T., "A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals", International Journal of Production Economics, VOL. 49, 1997.
- [Coudert,2000]** Coudert T., Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance. Thèse de doctorat soutenue à l'ENI de Tarbes (France), 2000.
- [Coudert,2000]** Coudert T., Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance. Thèse de doctorat soutenue à l'ENI de Tarbes (France), 2000.
- [Deloux,2005]** Deloux E., Castanier B., and Bérenguer C., Optimisation de la politique de maintenance pour un système à dégradation graduelle stressé, 7ème Congrès international pluridisciplinaire Qualité de Sûreté de Fonctionnement, 20, 21 et 22 mars 2007, volume1, Tanger (Maroc), 2007.
- [Espinouse,2001]** Espinouse M.L., Formanowicz P. & Penz B., "Complexity results and approximation algorithms for the two machines no-wait flowshop with limited machine availability", Journal of the operational research society, VOL. 52, 2001.
- [Esquirol P,1999]** Esquirol P, Lopez P. L'ordonnancement. Economica, Paris, France, 1999.
- [Georges J,2007]** Organisation et gestion de la production, 3ème édition, Dunod, 2007.
- [Giard V,1988]** Giard V. Gestion de production, Paris, Ed. Economica, 1988.
- [Goldberg,1994]** Goldberg G.E., « Algorithmes génétiques », Éditions AddisonWesley, Paris, 1994.

- [Graves,1999] Graves G. & Lee C.-Y., “Scheduling maintenance and semi-resumable jobs on single machine”, Naval Research Logistics, VOL. 46, pp.845-862, 1999.
- [Holland,1975] Holland J.H., « Adaptation in natural and artificial systems », PhD, Thesis Michigan Press University, Ann Arbor, Michigan, 1975
- [Lee C,2000] Lee C Y and Chen Z L, Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines. Naval Research Logistics, 2000.
- [Letouzey A,2001] Letouzey A, Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs: Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs. Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2001.
- [Mazouz,2012] Mazouz N. TP méta-heuristiques avec ParadisEO. 2012.
- [McCALL,1965] McCALL J.J., “Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey”, Management Science, VOL. 11(5), 1965.
- [Mesghouni,1999] Mesghouni K., « Application des algorithmes évolutionnistes dans les problèmes d’optimisation en ordonnancement de la production », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 1, 1999.
- [Monchy,1996] Monchy F., La fonction maintenance. Edition Masson, 1996.
- [Parunak H,1985] Parunak, H.V.D, Manufacturing experience with the contract net. In Proceedings of the Fith Workshop on Distributed Artificial Intelligence, 1985.
- [Paz,1994] Paz N.M. & Leigh W., “Maintenance scheduling: issues, results and research needs”, International Journal of Operations & Production Management, VOL. 14(8), 1994.
- [Pierskalla,1976] Pierskalla W. & Voelker J., “A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems”, Naval Research Logistics Quarterly, VOL. 23, 1976.
- [Qi,1999] Qi X., Chen T. & Tu F., “Scheduling the maintenance on single machine”, Journal of the Operational Research Society, VOL. 50(10), pp.1071-1078, 1999.
- [Retour,1990] Retour D., Bouche M. & Plauchu V., “Où va la maintenance industrielle”, Problèmes Économiques, VOL. 2 (159), 1990.
- [Rinnooy K,1976] Rinnooy Kan A.H.G. Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations. Martinus Nijhoff, The Haque, 1976.
- [Sanmarti,1997] Sanmarti E., Espuna A. & Puigjaner L., “Batch production and preventive maintenance scheduling under equipment failure uncertainty”, Computer Chemical Engineering, VOL. 21(10), pp.1157-1168, 1996.

- [**Tangour,2007**] Tangour F. Ordonnancement dynamique dans les industries agroalimentaires. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [**Tsai,2001**] Tsai Y.T., Wang K.S. & Teng H.Y., “Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms”, Reliability Engineering and System Safety, VOL. 74, 2001.
- [**Vacher,2000**] Vacher P., « Un système adaptatif par agents avec utilisation des algorithmes génétiques multi-objectifs : Application à l’ordonnancement d’atelier de type job-shop », Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2000.
- [**Verdol,1988**] Verdol P., Térotechnologie : interprétation économique d’un nouveau mode d’organisation intégrée de la disponibilité des équipements industriels, thèse de doctorat soutenue à l’université Lumière Lyon II (France), 1988.
- [**Weinstein L,1999**] Weinstein L and Chung C. H, Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment. Computers and Operations research, 1999.



## ملخص :

في هذه المذكرة، اقترحنا منهجية لحل مشكلة تداخل أوقات الصيانة الوقائية مع الأوقات العادية للأعمال والتي تؤثر سلبا على تاريخ نهاية الاعمال وذلك عن طريق خوارزمية جينية مطبقة على ورشة ذات ماكينات متسلسلة فلوشوب، وقد سبقنا ذلك ببحث ببليوغرافي حول الموضوع تناول شرح للإشكاليات المطروحة في الورشات الصناعية وعموميات حول طرق حلها وتقديم للخوارزمية الجينية وخصائصها وأيضا تعريف بالمثل التطبيقي الذي أجرينا عليه التجارب (MPS500) وقد خرجنا ببرنامج قابل للتطبيق بفعالية على مشاكل من هذا النوع.

*الكلمات الدالة: الصيانة الوقائية، فلوشوب، خوارزمية جينية، تاريخ نهاية الاعمال.*

## Abstract :

In this dissertation, we suggested a methodology to resolve the problem of overlapping preventive maintenance times with the makespan times. It negatively influenced the history of the work's end. That was through applying a genetic algorithm to the workshop of the sequential flow-shop machines. At the utmost, we introduced bibliographic research on the subject dealt with the industrial workshops, general hints about resolving the issue, and introducing the genetic Algorithm with its characteristics. We gave a clear cut definition about the pattern used in which we raised several experiments (MPS500). At the end we came up with an effective program to resolve problems in a like manner.

**Key-words:** *preventive maintenance, flow-shop, genetic algorithm, makespan.*

## Résumé :

Dans ce mémoire nous avons considéré un système de production de type flow-shop notre objectif est de faire un ordonnancement conjoint production / maintenance préventive planifier pour minimisé le makespan « le  $C_{max}$  ».

Pour cela, nous avons proposé un Méta-heuristique basé sur un algorithme génétique afin de résoudre ce problème pour mieux valorisé ce travail, nous avons appliqué sur un système réel MPS500. Le résultat obtenu démontre l'efficacité de l'approche proposée.

**Les mots clés :** *algorithme génétique, flow-shop, makespan, maintenance préventive.*