République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences
Département de Mathématiques

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Professionnel en Mathématiques Appliquées à la Gestion

Thème

Modélisation d'un processus de fabrication et résolution d'un problème d'ordonnancement de type Flow-Shop. Cas «ENIEM».

Membres du jury :

Président : **CHEBBAH Mouhamed**
Examinatrice : **KHEFFACHE Rezika**
Promotrice : **AKLOUCHE Fariza**

Réalisé par :

BELKHOUS Mounir
BOURAHLA Samia

Promotion : 2016/2017

Remerciements

Nous remercions notre DIEU qui nous a ouvert les portes du savoir et nous a permis de réaliser ce modeste travail.
Nous tenons à remercier vivement Mme AKLOUCHE.F, notre promotrice, de nous avoir encadrée, nous lui exprimons notre gratitude pour sa disponibilité, ses sérieux conseils et le soutien qu'elle nous a apporté tout au long de la préparation de ce mémoire.
Nous remercions également tout le personnel de l'entreprise ENIEM, plus particulièrement ceux du service ordonnancement.
Nos vifs remerciements s'adressent aux membres de jury qui ont aimablement accepter de nous honorer en lisant ce mémoire pour évaluer et apprécier notre travail, nous espérons qu'ils soient satisfaits.
Nous témoignons une reconnaissance particulière à l'ensemble des enseignants qui nous ont suivis pendant notre cursus.
En fin, nous remercions tous ceux qui nous ont encouragé tout au long de notre parcours universitaire et ceux qui ont attribué a notre formation de prés ou de loin.

Dédicaces

C'est avec de profonds sentiments, de respect et d'amour,
que je dédie ce travail.

A mes parents source d'amour et de courage, qui ont sacrifié pour que je puisse arriver jusque la et qui m'ont beaucoup
soutenu durant mon cursus.

A mon très chers grands père à qui je souhaite une
longue et heureuse vie.

A mes très chers frères et sœurs.
Qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité. Dieu vous garde pour moi.

A mon binôme Mounir avec qui j'ai le plaisir de partager ce travail, et à sa famille.

A mes très chéres(Lynda, Dina et Sabrina).

A mes amis et camarades de classe(Chanez, Dihia, Zohra, Cylia, Chahinez, Salim, Mahrez et Hocine)
Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.
Puisse Dieu, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.
A toute la promotion 2016/2017

Samia BOURAHLA

C'est avec de profonds sentiments, de respect et d'amour,
que je dédie ce travail.

A la mémoire de ma défunte maman, à la plus belle créature que Dieu a créée sur terre, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et mon éternelle gratitude. MERCI MAMAN.

A mon défunt petit frère Adam, repose en paix.

A mon père que je respecte qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutient permanent venu de toi.

A mes très chers frères Djamel, Lyes,
Karim et son épouse Souhila.
A mes très chers sœurs Cylia, et ma bien aimer Lyna.

Spéciale dédicace pour mon amie et binôme Samia avec qui j'ai le plaisir de partager ce travail.Et a toute sa famille

A mes amis (es) (Massi, Riad, Nabil, Hamiche, Houhou, mouloud, Ghiles, Halim, Chanez, Chahinez, dihia ...) et a tous ceux que je n'ai pas cité. Puisse Dieu, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes copains de chambre Mahrez, Salim et Hocine qui m'ont toujours soutenu, et a tous les anciens de Oued Aissi

Mounir BELKHOUS

Table des matières

Remerciements **i**

Dédicace **i**

Introduction générale **vi**

1 Présentation de l'entreprise **3**

1.1 Présentation de l'entreprise ENIEM 3

1.1.1 Situation géographique 3

1.1.2 Création et évolution 3

1.1.3 Objet social et champs d'activité 4

1.1.4 Capital social 4

1.1.5 Effectif de l 'ENIEM 4

1.2 Organisation de l'entreprise 5

1.2.1 Organisation générale de l'ENIEM 5

1.2.2 Organisation de l'unité froid 6

1.3 Organisation du service ordonnancement 7

1.3.1 Présentation du service ordonnancement(unité froid) 7

1.3.2 Objectifs de l'ordonnancement 7

1.3.3 Activités du service d'ordonnancement 8

2 Généralités sur l'ordonnancement **9**

2.1 Introduction 9

2.2 Rappel sur les notions d'ordonnancement 10

2.3 Formulation d'un problème d'ordonnancement 13

2.3.1 Les tâches 13

2.3.2 Les ressources 13

2.3.3 Les contraintes 13

2.3.4 Les critères 14

2.4 Ordonnancement dans différents types d'ateliers 15

2.4.1 Problème à une machine . . . 15
2.4.2 Problème à machines parallèles . . . 15
2.4.3 Problèmes d'atelier . . . 16
2.5 Méthodes de représentation des problèmes d'ordonnancement . . . 17
2.5.1 Le diagramme de GANTT . . . 18
2.5.2 Méthode PERT . . . 18
2.5.3 Méthode du potentiel (MPM) . . . 19
2.6 Classification des problèmes d'ordonnancement . . . 20
2.6.1 Le champ α (ressources) . . . 20
2.6.2 Le champ β (contraintes) . . . 21
2.6.3 Le champ γ (ressource) . . . 22
2.7 Complexité des problèmes d'ordonnancement . . . 22
2.8 Conclusion . . . 22

3 Problématique et modélisation des problèmes 24
3.1 Introduction . . . 24
3.1.1 L'objectif . . . 24
3.2 Modélisation des problèmes . . . 25
3.2.1 Modélisation graphique des ateliers . . . 25
3.2.2 Modélisation mathématique . . . 39
3.3 Conclusion . . . 41

4 Méthodes de résolution 42
4.1 Les méthodes exactes . . . 42
4.1.1 La programmation linéaire . . . 42
4.1.2 La programmation dynamique . . . 43
4.1.3 La méthode branch and bound . . . 43
4.2 Méthode approchées . . . 43
4.2.1 Les Méta-heuristiques (Les méthodes d'amélioration) . . . 43
4.2.2 Les Heuristiques (Les méthodes constructives) . . . 44

5 Application 46
5.1 Introduction . . . 46
5.2 Choix de la méthode . . . 46
5.3 Interprétation des données . . . 47
5.4 Application des algorithmes . . . 47
5.4.1 Algorithme de Johnson . . . 47
5.4.2 Algorithme NEH . . . 48
5.5 Interprétation des résultats . . . 52

5.6 NEH improvement 52
5.7 Conclusion 53

Conclusion générale **53**

Bibliographie **53**

Introduction générale

L'organisation et la gestion de la production conditionnent le succès des projets du monde de l'entreprise et de la recherche. Dans ce processus, la fonction ordonnancement vise à organiser l'utilisation des ressources technologiques ou humaines pour répondre à une demande ou satisfaire un plan de production préparé par la fonction planification. Ainsi, des programmes ambitieux privés ou publics ont recours à la fonction ordonnancement pour appréhender la complexité, améliorer les délais ou même s'adapter à des évènements imprévus. Les problèmes d'ordonnancement apparaissent dans de nombreux domaines : L'industrie (atelier, gestion de production), la construction (suivi de projets), mais aussi l'informatique (Gestion des processus) et l'administration (emplois du temps).

Dans un tel contexte, pour réussir, l'entreprise doit respecter essentiellement deux dimensions, à savoir une dimension technologique, qui vise à développer les programmes intrinsèques des produits mis sur le marché afin de satisfaire aux exigences de qualité et de la réduction des coûts de possession des produits. Une dimension organisationnelle, qui vise à développer la performance en terme de durée de cycle de fabrication, respect des dates de livraison prévues. Au centre de cette préoccupation on s'intéresse à un problème d'ordonnancement d'atelier de telle sorte à minimiser la durée totale d'exécution des tâches sur machines. L'objet de ce mémoire, est de traiter un cas particulier de problème d'ordonnancement ; les problèmes de type flow shop dont l'objectif est de minimiser la date de fin de l'exécution. Nous avons développé notre travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre résume les différentes informations sur l'organisme d'accueil, où on a effectué notre projet de fin d'étude ainsi que les ressources technologiques et humaines existantes au niveau des ateliers ou des services.

Le second chapitre propose, une vue d'ensemble sur les problèmes d'ordonnancement, des systèmes de production et sur leur complexité. Ainsi on a introduit les différentes composantes d'ordonnancement en présentant les types d'ateliers qui les caractérisent. Différentes représentations possibles des problèmes d'ordonnancement sont par la suite proposées.

La problématique et modélisation du problème d'ordonnancement et son analyse sont abordées dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre nous focalisons notre attention sur la présentation des différentes méthodes d'optimisation allant des méthodes exactes aux méthodes approchées.

Le dernier chapitre est consacré à la partie pratique. Le choix de l'approche proposée pour résoudre le problème et le problème conçu, y seront donc décrits et des exemples de résultats obtenus seront présentés et commentés.
Enfin, Nous avons terminé par une conclusion générale dans laquelle, nous avons retracé les grandes lignes de notre étude, en rappelant sommairement l'apport essentiel de notre travail.

Chapitre 1

Présentation de l'entreprise

Le but de cette phase est d'avoir une idée générale sur l 'organisme d'accueil et le contexte de l'étude, ce qui permet de préciser les frontières du domaine sur lequel doit porter cette étude.

1.1 Présentation de l'entreprise ENIEM

1.1.1 Situation géographique

Le complexe d'appareils ménager se trouve au sein de la zone industrielle Aissat-idir de Oued-Aissi distant de 7Km du chef-lieu de la Wilaya de Tizi-ouzou, il s'étale sur une superficie de 40 hectares et il relève administrativement la commune de Tizi-Rached.
Son siège social se situe au chef-lieu de Wilaya de Tizi-ouzou. La filiale sanitaire est installée à Miliana, Wilaya d'Aine Defla, et la filiale lampe est situé à la zone industrielle de Mohammedia, wilaya de Mascara.

1.1.2 Création et évolution

L'entreprise nationale des industries ENIEM est issue de la restriction de la société national de fabrication de matériel électrique (SONELEC)par décret présidentiel 83/19 de 2 janvier 1989, l'ENIEM dispose à sa création de :

- Complexe d'appareils ménagers(CAM) de TIZI-OUZOU entré en production en 1971
- Unité de lampe de Mohammedia de wilaya de MASCARA entré en production de février 1979

L'entreprise ENIEM est une entreprise publique économique, elle est passée à l'autonomie le 10 octobre 1989 et devenue société par action au capital de 40 000 000 DA Elle est la première entreprise Algérienne à certifier aux normes ISO 9002 en 1998 et ISO 9001/2000 en 2003 et renouveler en 2006 Son évolution se résume dans les étapes suivantes :

b . **La période 1980-1983 :** Phase de maitrise de processus de fabrication et de montage par le personnel locale de l'unité, limitation de l'activité de développement

c . **La période 1980-1990 :** Réalisation des opérations de développement, mis en place par le personnel local de réfrigérateur et de congélateur par le partenaire japonais " MITSU-TOSHIBA" et la nouvelle chaine de cuisine quatre et cinq feux par le partenaire italien "intercoop-techno gaz" ainsi le redéploiement des activités à l'intérieur et extérieure de l'unité.

d . **La période 1997-2000 :** Restructuration du complexe d'appareils ménagers (CAM) en unité de production est dictée par la maitrise de la production, de développement et la recherche en chaine des branches bien déterminées, la finalisation de l'unité lampes de MOUHAMMADIA a permis à l 'ENIEM de réduire les charges de gestion ainsi à ce jour l'ENIEM s'est vue dotée de plusieurs unités de production : froid, cuisson, climatisation, commercial et prestation technique sans oublier l'unité d'AIN-DEFLA spécialisé dans la fabrication baignoires, de receveur de douches et éviers de cuisine. [13]

1.1.3 Objet social et champs d'activité

L'entreprise est chargée dans le cadre national du développement économique et social et en liaison avec les structures et organismes concernés, de la recherche de développement et de la production des équipements, des produits et composants destinés à différentes branches de l'électroménager :

* Les équipements ménagers domestique.
* Les équipement ménagers industriel.
* Les appareils ménagers.

Les champs d'activité de l'entreprise se sont élargis à la prise en charge de la fonction distribution et de promotion du service après-vente

1.1.4 Capital social

L'entreprise ENIEM a été transformée juridiquement en société par action le 8 octobre 1989.Son capital social est de 10.279.800.000 DA détenu en totalité par le SGP.INELEC

1.1.5 Effectif de l 'ENIEM

L'effectif de l'ENIEM au 31/06/2016 est de 1700 employés

1.2 Organisation de l'entreprise

1.2.1 Organisation générale de l'ENIEM

L'entreprise s'est organisée comme suit :

- La direction générale : Elle est l'unique entité qui est responsable de la stratégie du développement de l'assistance et de contrôle de l'entreprise, elle exerce son autorité hiérarchique et fonctionnelle sur l'ensemble des unités. Elle regroupe des directions centrales suivantes :
  - Direction de gestion industrielle (exploitation).
  - Direction de développement et partenaire.
  - Direction finance et comptabilité.
  - Direction de planification de contrôle de gestion.
  - Direction de qualité.

Pour mettre en évidence tous ces points, nous présentons dans ce qui suit l'organisation général de l'ENIEM [1]

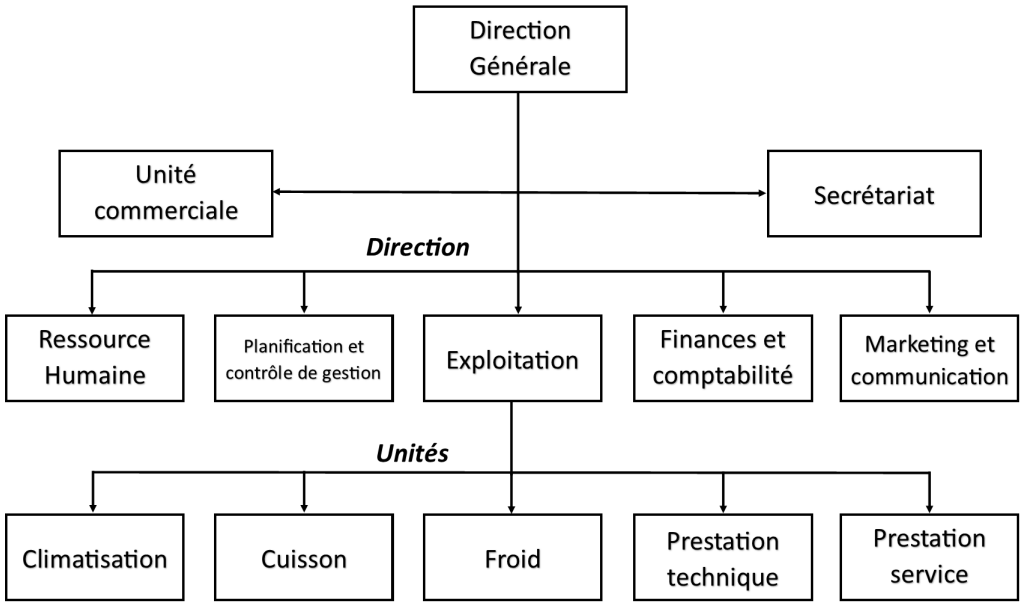

FIGURE 1.1 – Présentation général de l'ENIEM

Les missions

- **La direction générale** :La politique de l'entreprise est d'optimiser les moyens humains et financiers nécessaire au bon déroulement de ses politiques et stratégie.

- **Le contrôle de gestion** :Procéder aux ajustements nécessaires des écarts observés entre les prévisions et les résultats concrets de l'entreprise.

- **La recherche et le développement** :Améliorer les produits existants et /ou créer de nouveau en fonction de la politique pour répondre aux besoins de la clientèle.

- **Les services (fonctions) achats** :fournissent à l'entreprise les produits, matière et fournitures conformes à la qualité exigée en s'approvisionnant auprès des fournisseurs ayant des délais constants et à des prix aussi voisins que possible des prix prévue.

- **La production** : Met à la disposition du commercial les produits ou service correspondant à la qualité définie par la politique en respectant les délais constants et des prix aussi voisins que possible des prix prévus et un coût de transformation de fabrication le plus faible possible.

- **Le commercial** : C'est le responsable de la création de la marge en vendant à ses clients solvable.

- **L'ordonnancement :** Gère tous les stocks de l'entreprise ; matière ; marchandises ; produits en cours ; produit finis ; en fonction de la politique pour mettre les produits à la disposition du commercial au moment où celui-ci en a besoin. L'ordonnancement donne par conséquent des instructions sur les qualités à acheter ou sur l'importance des séries à mettre en fabrication.

- **L'administration** : Comptabilité des mouvements de valeurs,gère les personnels et assure l'entretien général, ce sont des fonctions indispensable pour qu'une entreprise puisse fonctionner.

1.2.2 Organisation de l'unité froid

L'unité froid est issue de la direction d'exploitation, elle a comme mission de produire des produits froids domestiques, elle possède des bâtiments industriels de stockage et des moyens adéquats à son exploitation, elle est composée de trois lignes de production, elle est scindée en sept départements et chaque département se compose de plusieurs services :

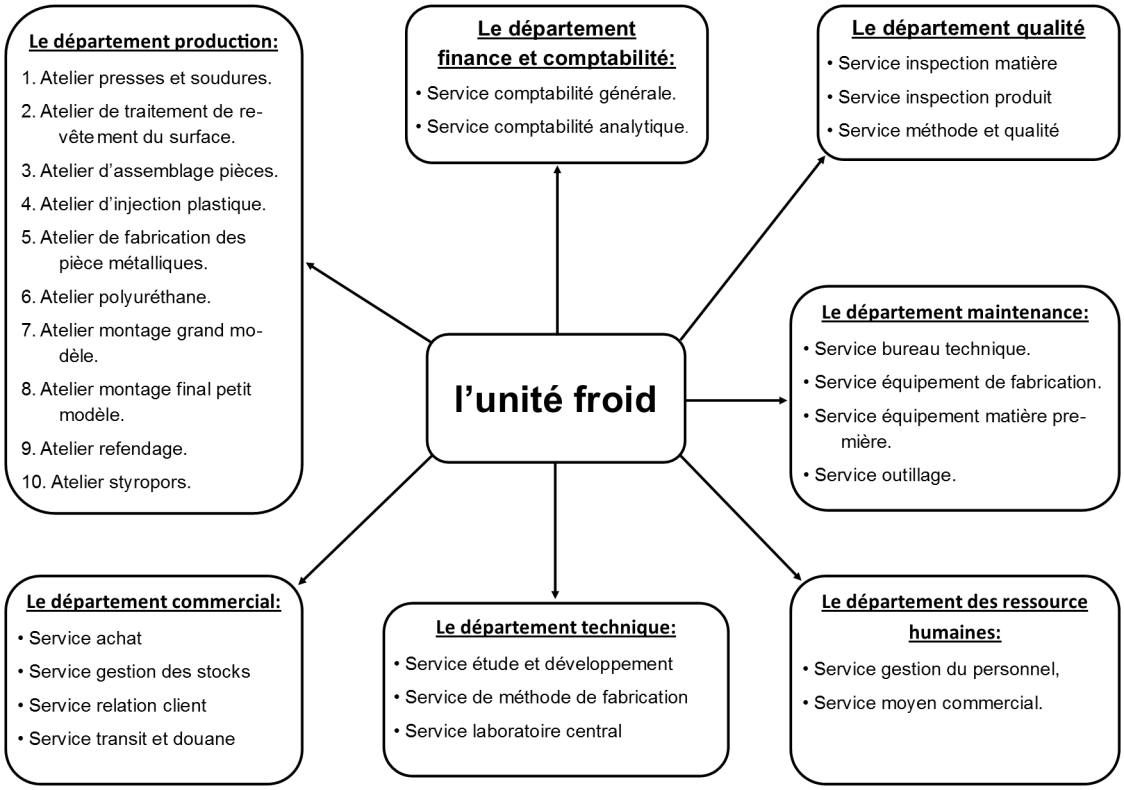

FIGURE 1.2 – Organisation de l'unité froid

1.3 Organisation du service ordonnancement

1.3.1 Présentation du service ordonnancement(unité froid)

L'ordonnancement est la fonction qui tend à la production en vue d'obtenir un produit de qualité constante dans les détails et au moindre coût.

Pour cela elle participe aux choix des programmes et enclenche les opérations entre les différents services (structures), jusqu'à la réalisation du produit fini.

D'une façon générale l'ordonnancement conduit les événements, enclenchement et coordonne les tâches (court terme et moyen terme) et optimise leurs réalisations par l'étude des besoins quantitatifs.[1]

1.3.2 Objectifs de l'ordonnancement

L'ordonnancement consiste à transformer les décisions de production définies par le programme directeur de la production en exécution afin de piloter et contrôler les ateliers.

la fonction de l'ordonnancement est partagé en trois :

1. Élaboration des **OF** (Ordre de Fabrication) : Elle consiste à transformer les décisions de production en ordre de fabrication.
2. Élaboration du planning ateliers :Le planning est élaboré en fonction en ordre de fabrication et de la disponibilité des ressources(matière, personnel, machine).
   Elle consiste à déterminer le calendrier prévisionnel en fonction de ces ressources.
3. Lancement suivi : Consiste à mettre aux ateliers en disposition les documents nécessaires et lancer la production.

1.3.3 Activités du service d'ordonnancement

Les activités du service d'ordonnancement sont :

- Choix et conception de la méthode de régulation du travail dans les différents secteurs de l'unité en fonction de la politique adaptée par la direction générale.
- Suit la production afin de pouvoir en détruire les objectifs d'activités de l'entreprise en fonction des objectifs de vente de la commerciale.
- Expression des besoins nécessaires à l'élaboration du produit à fabriquer en fonction des données fournies par les études et méthodes (département technique).
- Décision d'application pour les besoins de la production et du montage (pièces et matière première) en tenant compte des paramètres de gestion.
- Décision de lancement, de fabrication dans le temps, des quantités nécessaires à l'élaboration du produit en fonction du programme de fabrication et des cycles de fabrication définies par méthodes.
- Établir et classer les documents déclenchant l'exécution du travail.
- Déclencher l'exécution du travail.
- Distribuer le travail.
- Livraison aux ateliers des pièces et matière premières.
- Le contrôle de l'avancement des réalisation.

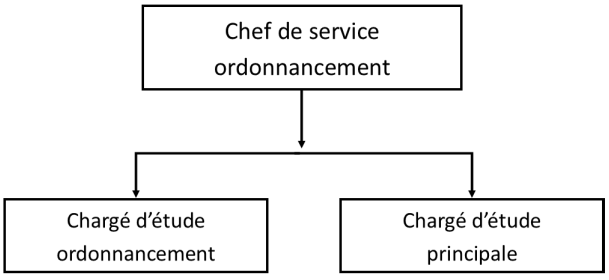

FIGURE 1.3 – Organigramme du service ordonnancement

Chapitre 2

Généralités sur l'ordonnancement

2.1 Introduction

L'ordonnancement est une branche de la recherche opérationnelle et de la gestion de la production qui vise à améliorer l'efficacité d'une entreprise en termes de coûts de production et de délais de livraison. Les problèmes d'ordonnancement sont présents dans tous les secteurs d'activités de l'économie, depuis l'industrie manufacturière jusqu'à l'informatique.
Ordonnancer le fonctionnement d'un système industriel de production consiste à gérer l'allocation des ressources au cours du temps, tout en optimisant au mieux un ensemble de critères. C'est aussi programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution.
Ordonnancer peut également consister à programmer l'exécution des opérations en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début de fabrication. D'une manière plus simple, un problème d'ordonnancement consiste à affecter des tâches à des ressources à des instants donnés pour répondre au mieux aux besoins exprimés par un client, au meilleur coût et dans les meilleurs délais, tout en tenant compte des contraintes. Les problèmes d'allocation des ressources, d'organisation des tâches, de respect des délais et de prise de décision en temps requis constituent autant de difficultés qu'il est nécessaire de surmonter dans la gestion des systèmes de production en milieu industriel.

Au niveau de l'entreprise, l'ordonnancement concerne plusieurs postes : les ventes, la production, maintenance, etc. Son rôle est de plus en plus important, car il permet une gestion de ces différents postes qui peut être optimale. Pour la bonne gestion de ces postes ainsi que des contraintes pouvant y être reliées, il est nécessaire :

– De déterminer les différentes opérations à réaliser, les dates correspondantes, les moyens matériels et humains à y affecter,

– D'exécuter ces opérations et de contrôler les coûts qui en découlent. C'est ainsi que l'ordonnancement intervient pour permettre la meilleure gestion possible du système de production.

2.2 Rappel sur les notions d'ordonnancement

Graphe

Un graphe est un dessin géométrique défini par la donnée d'un ensemble de points (appelées sommets ou nœuds), reliés entre eux par un ensemble de flèches (Appelées arcs). Chaque arc a pour extrémités deux points, éventuellement confondus.[14]

Graphe orienté

En théorie des graphes, un graphe orienté $G = (X, A)$ est défini par la donnée d'un ensemble de sommets X et d'un ensemble d'arcs A, chaque arc étant un couple de sommets. Par exemple, si x et y sont des sommets, les couples (x, y) et (y, x) peuvent être des arcs du graphe G :
dans ce cas, ils sont notés respectivement xy et yx.

Chemin

Soit $G = (X, U)$ un graphe,
Un chemin du sommet X_0 à X_k dans un graphe G, est une suite de sommets reliés successivement par des arcs orientés dans le même sens ;
On le note : $(X_0, X_1, X_2, ..., X_k)$

– *Le chemin critique :* d'un projet est la plus longue séquence de tâches qui doit être accomplie pour que le projet soit terminé à la date due.[14]

Circuit

Le circuit est un chemin simple dont les extrémités coïncident. (dans les graphes orienté seulement).

Réseau

Un réseau est un graphe $G = (X, U)$ muni d'une application $d : U \to R$ qui à chaque arc fait correspondre un poids $d(u)$, on note un tel réseau par $R = (XU, d)$. On pratique $d(u)$ peut matérialiser un coût, une distance, une durée ...etc.

Arbre

Un arbre est un graphe simple connexe ne possédant pas de cycle.
Soit n le nombre de sommets d'un graphe G et m le nombre de ses arcs :

- Si G est connexe $m \geq n-1$.
- Si G est sans $cycles \Rightarrow m \leq n-1$.

Arborescence

Un graphe $G=(X,U)$, avec $\mid X \mid = n \geq 2$ sommets est une arborescence de racine s si :

- G est un arbre.
- S est une racine de G.

Un sommet s d'un graphe G est une racine de G s'il existe un chemin joignant s à chaque sommet du graphe G.
Un sommet z d'un graphe G est une anti-racine de G s'il existe un chemin joignant chaque sommet du graphe G à z.

Makespan

C'est la date de fin d'exécution de l'ordonnancement,(C_{max})

La mise en ordre d'un graphe(l'ordonnancement d'un graphe)

Ordonner un graphe revient à disposer dans un certain ordre ses sommets tels que les arcs soient dans le même sens. On définit ainsi les différents niveaux des sommets. L'ordonnancement d'un graphe se traduit par l'algorithme suivant :

Principe de l'algorithme :

Soit le graphe orienté $G=(X,U)$. Les différents niveaux de sommet du graphe ainsi que le graphe ordonné de G sont définis comme suit :

(0) On détermine les prédécesseurs des sommets du graphe G.

(1) On marque dans le graphe G tous les sommets n'ayant pas de prédécesseurs ($\gamma_G^-(x) = \varnothing$).

- On pose N_0 l'ensemble des sommets du graphe n'ayant pas de prédécesseurs, on l'appelle niveau nul.
- On barre dans la colonne des $(\gamma G^-(x))$ tous les sommets de niveau nul N_0, on obtient une nouvelle colonne $(\gamma G_1^-(x))$, avec G_1 est un sous- graphe engendré par X/N_0

(2) On repère dans le graphe G_1 tous sommets n'ayant pas de prédécesseurs $(\gamma G_1^-(x))$.

- On pose N_1 l'ensemble des sommets n'ayant pas de prédécesseurs.

– On barre dans la colonne $(\gamma G_1^-(x))$ tous les sommets de niveau nul N_1, on obtient une nouvelle colonne $(\gamma G_2^-(x))$, avec G_2 est un sous graphe engendré par $X/N_0 \cup N_1$.

On continue le même procédé jusqu'au dernier sommet.

Recherche du plus court(long) chemin dans un graphe :

Les problèmes de cheminement dans les graphes (en particulier la recherche d'un plus court chemin) comptent parmi les problèmes les plus anciens de la théorie des graphes et les plus importants par leurs applications.
pour la résolution de ces problèmes on se tourne ver des algorithme qui calcule le plus court (long) chemin, parmi ces algorithme on cite l'algorithme de Bellman.

Le principe :
L'idée de l'algorithme de Bellman, est de calculer de proche en proche l'arborescence de plus courtes distances, issue du sommet s à un sommet donné p.

On ne calcule la plus courte distance du sommet s à y, que si on a déjà calculé les plus courtes distance du sommet s à tous les prédécesseurs du sommet y.

Algorithme de Bellman[14]

Données : Un graphe $R = (X, U, d)$ sans circuit avec $d(u) \in R$

Résultat : Arborescence de plus courtes distances A.

(0) Initialisation :

Soit s un sommet de X, on pose $S = \{s\}$ et $\pi(s) = 0$ $A = \emptyset$

(1) Chercher un sommet hors de S dont tous les prédécesseurs sont dans S

► Si un tel sommet n'existe pas ; Terminer

Dans ce cas soit $S = X$, ou le sommet s n'est pas une racine dans R

► Si un tel sommet existe ; Aller en (2)

(2) On pose : $\pi(x) = Min\{\pi(I(u)) + d(u)\}$.

Soit u l'arc pour lequel $\pi(x) = \pi(I(u)) + d(u)$

$A := A \cup \{u\}; S := S \cup \{x\}$ Aller à (1)

Remarque 2.1. *Dans notre cas l'algorithme de belleman sert à calculer le plus long chemin. Alors en remplace le Min par Max*

2.3 Formulation d'un problème d'ordonnancement

Définition 2.1. *Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu des contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînements, ...) et des contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises.[4]*

Les éléments nécessaires pour formuler un problème d'ordonnancement sont :

2.3.1 Les tâches

Une tâche est une entité élémentaire localisée dans le temps, par une date de début et/ou de fin, et dont la réalisation nécessite une durée préalablement définie.
Elle est constituée d'un ensemble d'opérations qui requiert, pour son exécution, certaines ressources et qu'il est nécessaire de programmer de façon à optimiser un certain objectif.
On distingue deux types de tâches :

les tâches morcelables (préemptibles) qui peuvent être exécutées en plusieurs fois, facilitant ainsi la résolution de certains problèmes.

les tâches non morcelables (indivisibles) qui doivent être exécutées en une seule fois et ne sont interrompues qu'une fois terminées.

2.3.2 Les ressources

Une ressource est un moyen technique ou humain utilisé pour réaliser une tâche. On trouve plusieurs types de ressources :

les ressources renouvelables, qui, après avoir été allouées à une tâche, redeviennent disponibles (machines, personnel, etc)

les ressources consommables, qui, après avoir été allouées à une tâche, ne sont plus disponibles (argent, matières premières, etc)

Qu'elle soit renouvelable ou consommable, la disponibilité d'une ressource peut varier au cours du temps. Par ailleurs, dans le cas des ressources renouvelables, on distingue principalement, les ressources disjonctives qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois et les ressources cumulatives qui peuvent être utilisées par plusieurs tâches simultanément mais en nombre limité .

2.3.3 Les contraintes

Suivant la disponibilité des ressources et suivant l'évolution temporelle, deux types de contraintes peuvent être distinguées : contraintes de ressources et contraintes temporelles.

Les contraintes de ressources : Plusieurs types de contraintes peuvent être induites par la nature des ressources. A titre d'exemple, la capacité limitée d'une ressource implique un certain nombre, à ne pas dépasser, de tâches à exécuter sur cette ressource.
Les contraintes relatives aux ressources peuvent être disjonctives, induisant une contrainte de réalisation des tâches sur des intervalles temporels disjoints pour une même ressource, ou cumulatives impliquant la limitation du nombre de tâches àréaliser en parallèle.

Les contraintes temporelles : elles représentent des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre certaines variables temporelles d'ordonnancement. Ces contraintes peuvent être :
- des contraintes de dates butoirs, certaines tâches doivent être achevées avant une date préalablement fixée
- des contraintes de précédence, une tâche i doit précéder la tâche j, des contraintes de dates au plus tôt, liées à l'indisponibilité de certains facteurs nécessaires pour commencer l'exécution des tâches.

2.3.4 Les critères

Un critère correspond à des exigences qualitatives et quantitatives à satisfaire permettant d'évaluer la qualité de l'ordonnancement établi.

Les critères dépendant d'une application donnée sont très nombreux ; plusieurs critères peuvent être retenus pour une même application. Le choix de la solution la plus satisfaisante dépend du ou des critères préalablement définis, pouvant être classés suivant deux types, réguliers et irréguliers.

Les critères réguliers constituent des fonctions décroissantes des dates d'achèvement des opérations. Quelques exemples sont cités ci-dessous :
- la minimisation des dates d'achèvement des actions,
- la minimisation du maximum des dates d'achèvement des actions,
- la minimisation de la moyenne des dates d'achèvement des actions,
- la minimisation des retards sur les dates d'achèvement des actions,
- la minimisation du maximum des retards sur les dates d'achèvement des actions.

Les critères irréguliers sont des critères non réguliers, c'est-à-dire qui ne sont pas des fonctions monotones des dates de fin d'exécution des opérations, tels que :
- la minimisation des encours,
- la minimisation du coût de stockage des matières premières,
- l'équilibrage des charges des machines,
- l'optimisation des changements d'outils.[4]

2.4 Ordonnancement dans différents types d'ateliers

- m machines différentes $M_i, i \in \{1,..,m\}$
- n travaux (jobs) $J_j, j \in \{1,..,n\}$
  - Chaque job J_j est décrit par n_j tâches ou opérations $O_{i,j}, j \in \{1,..,n_j\}$
  - La durée d'une opération $O_{i,j}$ est $C_{i,j}$
  - La machine qui exécute l'opération $O_{i,j}$ du job est notée $M(O_{i,j})$ ou $M_{i,j}$.
  - Les opérations d'un même job ne peuvent pas être exécutées simultanément. [2]

2.4.1 Problème à une machine

Dans ce cas, l'ensemble des tâches à réaliser est fait par une seule machine, les tâches alors sont composées d'une seul opération qui nécessite la même machine, toute tâche J_j, $j \in \{1,..,n\}$ de durées C_j, s'exécute sur une machine qui ne peut traiter plus qu'une tâche à la fois.[3]

2.4.2 Problème à machines parallèles

Toute tâche J_j, $j \in \{1,...,n\}$ peut être exécutée indifféremment sur une des "m" machines mises en parallèle.[2]

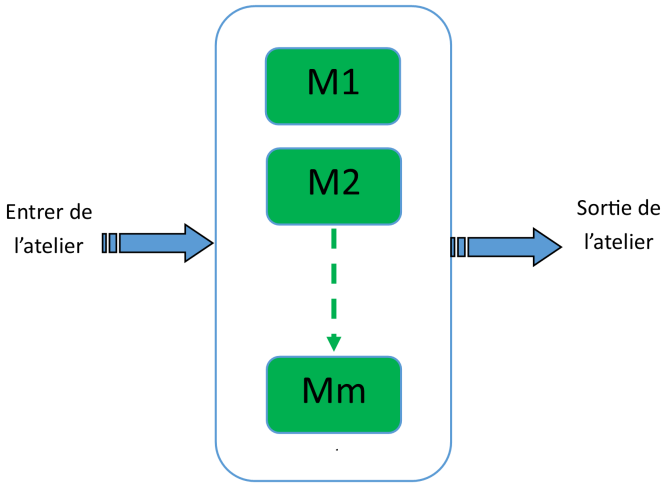

FIGURE 2.1 – Atelier a machine parallèle

2.4.3 Problèmes d'atelier

Ateliers à cheminement unique : flow-shop [2]

Chaque Job est constitué de "m" opérations et l'ordre de passage sur les différentes machines est le même pour tous les jobs J_j :$O_{1,j} \rightarrow O_{2,j} \rightarrow, ..., \rightarrow O_{m,j}$

FIGURE 2.2 – Atelier de type Flow-shop

Atelier de type flow-shop hybride

Dans l'atelier de type flow-shop hybride, une machine peut exister en plusieurs exemplaires identiques fonctionnant en parallèle.[3]

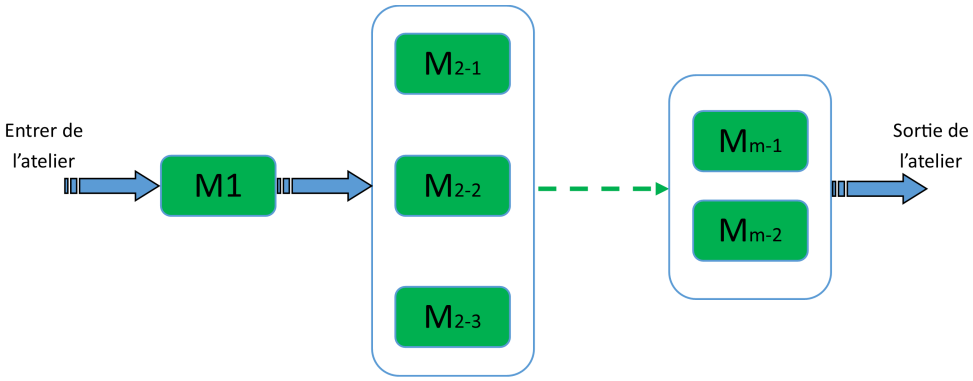

FIGURE 2.3 – Atelier de type Flow-shop hybride

Ateliers à cheminement quelconque : Job-Shop

Appelés également ateliers à cheminement multiple, ce sont des ateliers où les opérations sont réalisées selon un ordre bien déterminé, le nombre d'opération n'est pas forcement le même pour tous les jobs et chaque job a son propre ordre de passage sur les machines, et peut être exécuté plusieurs fois par la même machine. [3]

Un exemple de ce type d'environnement, on cite le problème de fabrication de meubles dans une menuiserie : une pièce de bois peut passer par une première machine (la scie), puis

aller vers une autre machine (une perceuse) et revenir sur la première machine pour être coupée une autre fois.

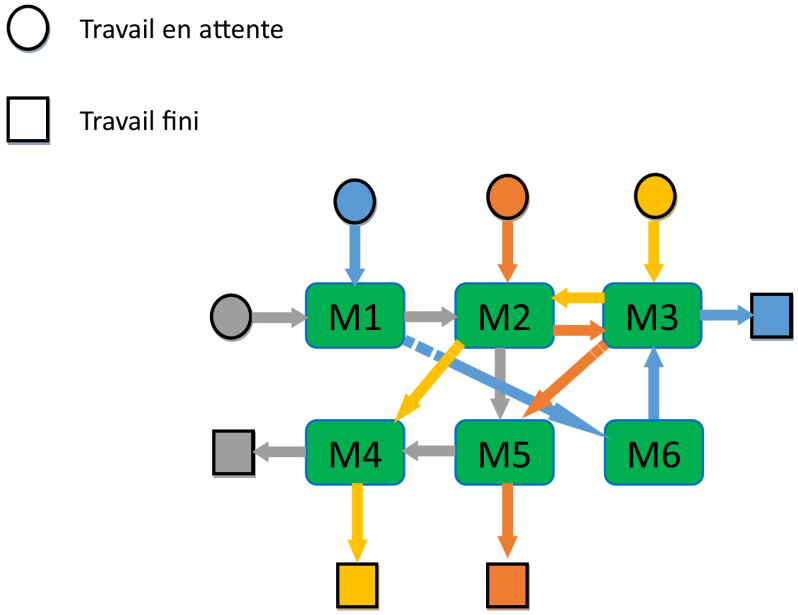

FIGURE 2.4 – Atelier de type Job-shop

Atelier de type Open-Shop

Ce type d'atelier est moins contraint que celui de flow-shop ou de job-shop, le nombre d'opérations n'est pas forcement le même pour tous les jobs ainsi l'ordre de passage sur les machines est totalement libre.
Un exemple de ce type d'environnement, le problème d'ordonnancement d'un garage dans lequel des voitures(job) doivent passer sur différents postes de travail(machines) ,comme la vidange, le graissage, le lavage, l'ordre de ce passage est totalement libre c'est-à-dire on peut passer de lavage de voiture après le graissage et en fin par la vidange ... etc

2.5 Méthodes de représentation des problèmes d'ordonnancement

Les méthodes d'ordonnancement des tâches permettent d'avoir une représentation graphique (immuable ou non) d'une réalisation en représentant chaque opération (ou tâche) par un arc, une liaison, ou un rectangle qui peut être proportionnel ou non à la durée. Ce graphique dans tous les cas permet le positionnement relatif des opérations dans le temps.

Il existe trois sortes de présentations possibles d'un problème d'ordonnancement : le diagramme de GANTT, le graphe potentiel-tâches (MPM), et la méthode PERT

2.5.1 Le diagramme de GANTT

Ce type de diagramme a été mis au point par un Américain Henry GANTT en 1910, celui-ci indique, selon une échelle temporelle l'occupation des machines par les différentes taches, les temps morts, et les éventuelles indisponibilités des machines dues au changement entre tâches, par exemple :
Les taches T1, T2 et T3 sont traitées par la machine M1, M2 et M3 comme le montre la figure 2.5. Donc la durée que va prendre l'aboutissement des 3 tâches sur les 3 machines est $26h$.

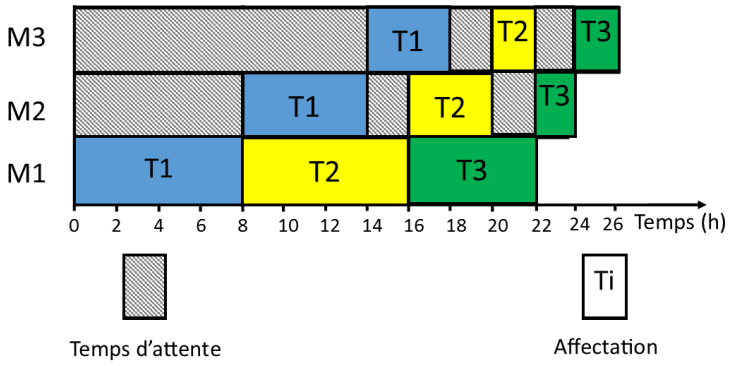

FIGURE 2.5 – Exemple illustrative du Diagramme de GANTT

2.5.2 Méthode PERT

A la fin des années cinquante, l'armée américaine, traumatisée par l'avance des russes (programme Spoutnik) conçoit une nouvelle technique d'ordonnancement qui devait conduire à des gains de temps importants dans la réalisation de ses missiles à ogive nucléaire Polaris : c'est la technique PERT (Programme Evaluation and Review Technique).

Notions de base :

La méthode s'appuie en grande partie sur une représentation graphique qui permet de bâtir un «réseau PERT»
un réseau PERT est constituer par des tâches et des étapes

– **Etape** : Commencement ou fin d'une tâche. Une étape n'a pas de durée. On symbolise une étape (ou «nœud») sur le réseau par un rectangle.
– **Tâche** : Déroulement dans le temps d'une opération. Contrairement à l'étape, la tâche est pénalisante car elle demande toujours une certaine durée, des moyens (ou ressources) et coûte de l'argent. Elle est symbolisée par un vecteur (ou arc orienté, ou liaison orientée) sur lequel seront indiqués l'action à effectuer et le temps estimé de réalisation de cette tâche.[7]

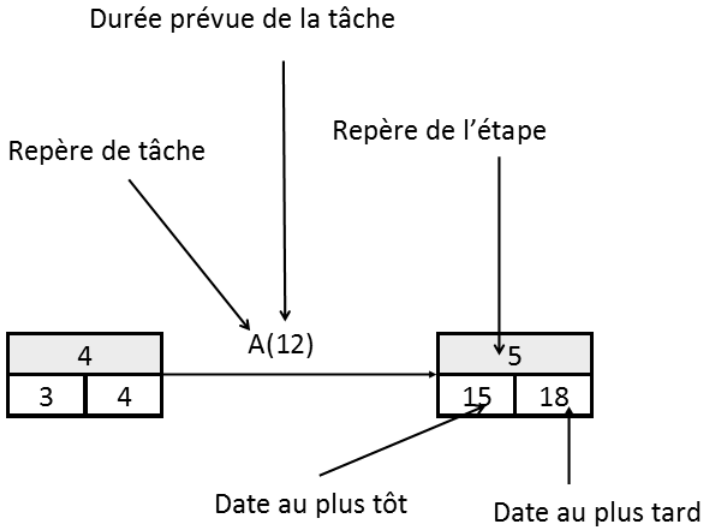

FIGURE 2.6 – Exemple illustrative du réseau PERT

2.5.3 Méthode du potentiel (MPM)

La Méthode des Potentiels et antécédents Métra (MPM) est une méthode d'ordonnancement basée sur la théorie des graphes, et visant à optimiser la planification des tâches d'un projet. Semblable à PERT, les principales différences entre les deux méthodes reposent essentiellement dans la construction du graphe. Elle a été développée par le chercheur français Bernard Roy, en 1958.

Notions de base :

La méthode est une représentation graphique qui permet de bâtir un «réseau».
ce réseau est constitué par des tâches .

– **Tâche** : Déroulement dans le temps d'une opération. La tâche est pénalisante car elle demande toujours une certaine durée, des moyens (ou ressources) et coûte de l'argent. Ici elle est symbolisée par un rectangle dans lequel seront indiqués la date au plus tôt et la date au plus tard, ainsi que le repère de la tâche.
Le temps estimé de réalisation de cette tâche est rapporté par l'arc qui part d'une tâche.

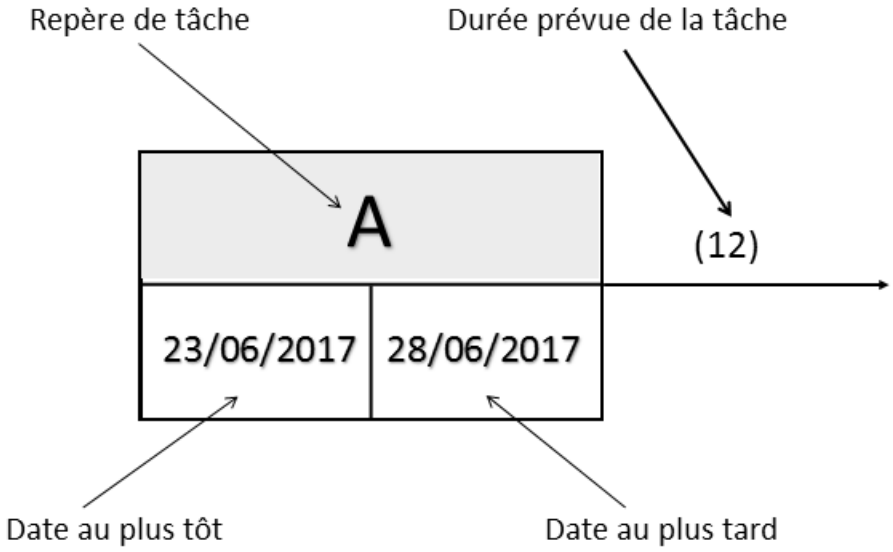

FIGURE 2.7 – Exemple illustrative du réseau MPM

2.6 Classification des problèmes d'ordonnancement

Étant donné la diversité des problèmes d'ordonnancement, un formalisme permettant de distinguer ces différents problèmes entre eux et les classifier est utilisé, ce formalisme comporte trois champs $\alpha/\beta/\gamma$, cette notion introduite par Graham et Al est couramment utilisée pour distinguer les différentes entités d'un problème d'ordonnancement, ces champs se caractérisent comme suit :[8]

2.6.1 Le champ α (ressources)

Le champ α décrit les machines utilisées, le type de machines, leur nombre, et le type d'atelier, il est composé de plusieurs sous champs et est distingué par :
$\alpha = \alpha_1, \alpha_2$ tel que :

- $\alpha_1 \in \{1, P, Q, R, O, F, J\}$.

- ► $\alpha_1 = 1$: une seule machine.
- ► $\alpha_1 = P$: machines parallèles identique.
- ► $\alpha_1 = Q$: machines parallèles uniformes.
- ► $\alpha_1 = R$: machines parallèles différentes.
- ► $\alpha_1 = O$: machines spécialisées (Open shop).
- ► $\alpha_1 = F$: machines spécialisées (Flow shop).
- ► $\alpha_1 = J$: machines spécialisées (job shop).

• $\alpha_2 \in \{\emptyset, K\}$:

- ► $\alpha_2 = \emptyset$: Le nombre de machines est variable.
- ► $\alpha_2 = K$: Le nombre de machines est égal à K avec $K \in N^*$

2.6.2 Le champ β (contraintes)

Le camps β décrit les taches, les contraintes liées aux tâches, il est composé de cinq sous champs,
$\beta = \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ tel que :

• $\beta_1 \in \{\emptyset, pmtn\}$: indique la possibilité d'interruption des tâches.

- ► $\beta_1 = \emptyset$: La préemption des tâches n'est pas autorisée.
- ► $\beta_1 = pmtn$: La préemption des tâches autorisée.

• $\beta_2 \in \{\emptyset, prec, tree, chain, ...\}$: indique le type de contraintes de précédence.

- ► $\beta_2 = \emptyset$: pas de contraintes de précédence (les tâches sont indépendantes) ;
- ► $\beta_2 = prec$: les contraintes de précédence sont quelconques ;
- ► $\beta_2 = tree$: les contrainte de précédence sont données sous forme d'un arbre.

• $\beta_3 \in \{\emptyset, r_i\}$: décrit les dates de disponibilité.

- ► $\beta_3 \neq \emptyset$: toutes les dates de disponibilité sont nulles ;
- ► $\beta_3 = r_i$: ils existent des dates de disponibilité différentes.

• $\beta_4 \in \{\emptyset, P_i = P; \underline{P} \leq P_i \leq \overline{P}\}$:indique les temps de traitement.

- ► $\beta_4 = \emptyset$: les temps de traitement des tâches sont différents.
- ► $\beta_4 = C_i = C$: les temps de traitement des tâches sont tous égaux à C.
- ► $\beta_4 = \underline{C} \leq C_i \leq \overline{C}\}$: les temps de traitement des tâches sont compris entre $\underline{C}$ et $\overline{C}$.

• $\beta_5 \in \{\emptyset, d_i\}$

- ► $\beta_5 = \emptyset$: soit on n'a pas de dates échues, soit on a des tâches échues dans le cas où le critère d'optimisation est en fonction de ces dernières.
- ► $\beta_5 = d_i$: il existe des dates échues.

2.6.3 Le champ γ (ressource)

Le champs γ décrit le critère qu'on veut optimiser.

- $\gamma \in \{C_{max}, \sum C_i, \sum D_i\}$.

2.7 Complexité des problèmes d'ordonnancement

La théorie de la complexité s'intéresse à l'étude formelle de la difficulté théorique intrinsèque des problèmes en informatique ou d'un problème par rapport à un autre et de l'analyse de la complexité des programmes et des algorithmes. Concrètement, on cherche à savoir si le problème étudié est plutôt « facile » ou plutôt « difficile » à résoudre en se basant sur une estimation (théorique) des temps de calcul et des besoins en mémoire informatique.

Les problèmes d'ordonnancement sont des problèmes d'optimisation combinatoire. Pour résoudre un problème d'ordonnancement, nous devons toujours chercher à établir sa complexité, car cela détermine la nature de l'algorithme à mettre en œuvre. Si le problème étudié appartient à la classe P, nous savons d'avance qu'un algorithme polynomial existe pour le résoudre.
Dans le cas contraire, si le problème est NP-difficile, deux approches sont possibles. La première est de proposer un algorithme approché, donc une heuristique, qui calcule en temps polynomial une solution s'approchant au mieux de la solution optimale. Une alternative est de proposer un algorithme qui calcule la solution optimale du problème, mais pour lequel la complexité dans le pire des cas est exponentielle. Dans ce cas, le défi est de concevoir un algorithme qui peut résoudre en temps acceptable les problèmes de la plus grande taille possible.[5]

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté les notions, les caractéristiques générales des problèmes d'ordonnancement et les différentes méthodes pouvant être utiliser pour la présentation et classifications des problèmes, dans un autre temps, nous avons fait un survol sur la complexité des problèmes d'ordonnancement en particulier, les problèmes que nous allons étudier par la suite.

Problématique

L'ENIEM est spécialisée dans la production continue, qui est une production en stock. Elle produit des différents appareils électro-ménager selon le programme annuel de production qui est tracé par la direction générale chaque année pour chaque produit donné.

En premier lieu, le travail qui nous a été confié par les techniciens supérieurs de l'ordonnancement est de calculer les durées au plus tôt et au plus tard de chaque tâche, afin de définir la durée de fin de projet.

Le deuxième travail est d'optimiser la production d'un processus de fabrication des clayettes qui est une chaine de production au sein de l'atelier de fabrication des pièces métalliques.

Notre objectif est d'organiser l'ordre de passage des n tâches sur les M machines de telle sorte à optimiser et à minimiser la durée de fin de projet (C_{max}), pour cela on a opté pour les méthodes heuristiques qui sont les plus utilisées pour résoudre la majorité des problèmes d'ordonnancement :

1. L'heuristique de JOHNSON
2. L'heuristique NEH (Nawaz-Enscore-Ham)

Chapitre 3

Problématique et modélisation des problèmes

3.1 Introduction

Le plus difficile dans un ordonnancement c'est de modéliser le problème, fabriquer un modèle mathématique ou graphique à partir des données recueillies sur le terrain.
Ce chapitre consiste à trouver la problématique, puis modéliser graphiquement grâce aux réseaux PERT (Program Evaluation and Review Technique), MPM (Méthode des Potentiels Métra) et Mathématiquement à l'aide du logiciel LINGO qui est une application de programmation linéaire.

3.1.1 L'objectif

La direction du service générale détermine le programme de production pour une année avec le nombre à produire pour cette même année pour chaque modèle avec leurs cadences journalières.
L'objectif du service ordonnancement est d'organiser la production afin de respecter ce programme et de veiller sur la qualité et le bon déroulement de cette production.
Notre objectif au niveau de cette entreprise est de :

- Calcule des durées au plus tôt et au plus tard, dans le but de déterminer la durée de fin de projet ainsi prévoir la priorité des tâches, et avoir un plan de chaque atelier.

3.2 Modélisation des problèmes

3.2.1 Modélisation graphique des ateliers

Les machines sont placées dans les différents ateliers, elles sont divisées en deux, ceux qui appartiennent à la chaîne de préfabrication et ceux qui appartiennent à la chaîne principale. Après calcule des dates au plus tôt et au plus tard, à l'aide de l'algorithme de Bellman on a su modéliser les ateliers graphiquement ainsi trouvé les chemins critiques (S) de chaque graphe, et sa durée de fin de projet (Dp).

Ateliers appartenant à la chaine de prés-fabrication

Atelier Refendage «A» : L'atelier refendage ou refendage de tôle est une opération qui consiste à découper la tôle par l'intermédiaire de ligne de refendage en plusieurs morceaux.

Atelier refendage «A »		
la tâche	**Description de la tâche**	**Durée de la tâche (min)**
A_{a_1}	Déroulement du rouleau de métal et vérification de la qualité 1	8.05
A_{a_2}	roulement du rouleau de métal 1	8.05
A_{a_3}	Découpe des pièces 1	0.06
A_{b_1}	Déroulement du rouleau de métal et vérification de la qualité 2	8.08
A_{b_2}	roulement du rouleau de métal 2	8.08
A_{b_3}	Découpe des pièces 2	0.06

Après application des deux algorithmes a savoir l'algorithme de mise en ordre d'un graphe et l'algorithme de Bellman on a obtenu Le graphe suivant représentant le cheminement des étapes de fabrication des tôles pour armoire et de la porte, avec le réseau PERT.

- $S1(A) = (A_{a1}; A_{a2}; A_{a3})$
- $S2(A) = (A_{b1}; A_{b2}; A_{b3})$
- avec une durée de fin de projet $Dp(A) = 16,16min$

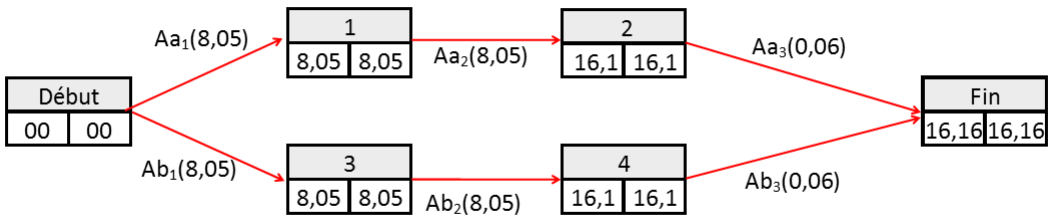

FIGURE 3.1 – Atelier refendage

Atelier pièces métallique «B» : Dans cet atelier on fabrique tous type de condenseurs et de clayette, on transforme tous type d'évaporateurs. L'atelier est composé de 4 chaines préfabriquées à savoir :

* Chaine de transformation évaporateurs «Ba»
* Chaine de fabrication de condenseur «Bb»
* Chaine de fabrication du tube raccord de charge «Bc»
* Chaine de fabrication du tube d'aspiration «Bd»

Atelier pièces métallique « B »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
B_{a_1}	* Poinçonnage évaporateur	0.05
B_{a_2}	Cintrage évaporateur	0.05
B_{a_3}	Ouverture du trou pour gaz	0.45
B_{a_4}	Soudure du tube de jonction	1.96
B_{a_5}	Essai d'étanchéité pour évaporateur	0.29
B_{a_6}	Peinture évaporateur	1.43
B_{b_1}	* Chargement des fils	2.5
B_{b_2}	Redressage et découpe des tubes	0.17
B_{b_3}	Cintrage du tube condenseur en serpentin	0.18
B_{b_4}	Redressage, fourniture des fils	0.26
B_{b_5}	Presse estampeuse	0.5
B_{b_6}	Cintrage des bouts	0.5
B_{b_7}	Peinture condenseur	2.97
B_{c_1}	* Découpe des tubes de charge langueur 100 mm	0.03
B_{c_2}	Evaser le tube des deux cotées	0.006
B_{c_3}	Nettoyage par soufre	0.006
B_{d_1}	*Evaser le tube d'aspiration	0.13
B_{d_2}	Braser le tube d'aspiration	0.36
B_{d_3}	Enrouler le tube capillaire	0.74
B_{d_4}	Braser les tubes 1 et 2	0.28
B_{d_5}	Nettoyage et soufflage d'air	0.006
B_{d_6}	Cintrer le tube d'aspiration	0.31

Le graphe si dessous représente la modélisation par PERT des 4 chaines de préfabrication a savoir (Ba, Bb, Bc, Bd) en suivant le tableau précédent.

- $S(B) = (B_{b1}; B_{b2}; B_{b3}; B_{b4}; B_{b5}; B_{b6}; B_{b7};)$.
- $Dp(B) = 7,08min$

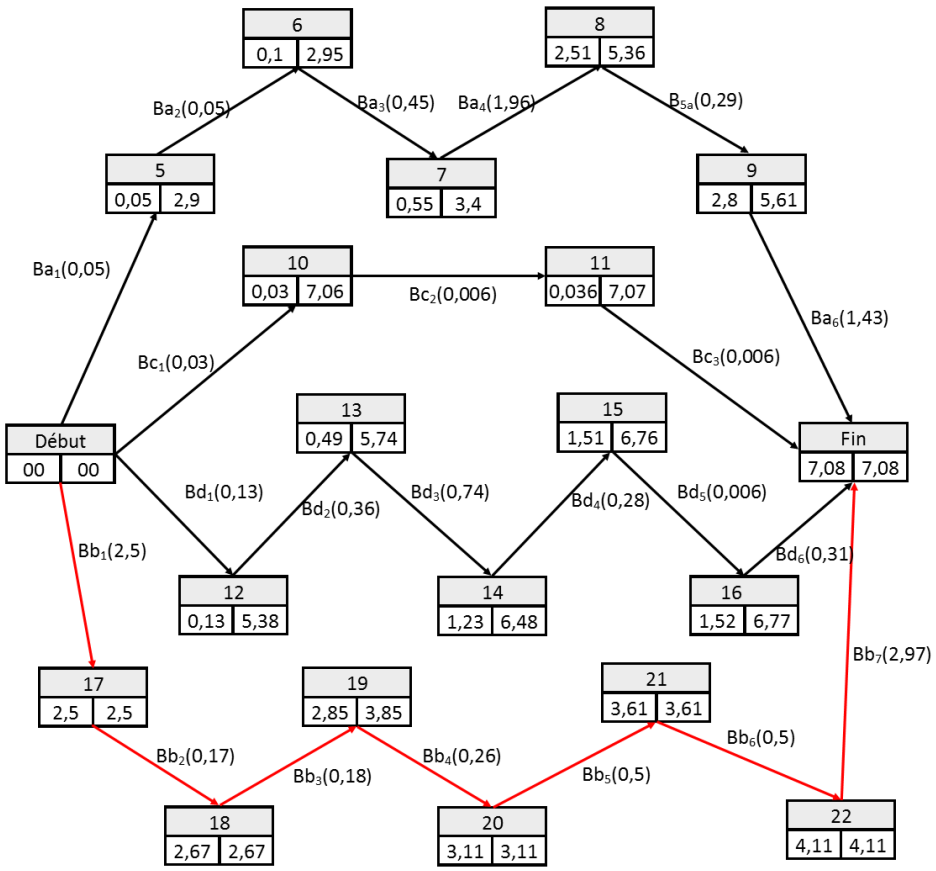

FIGURE 3.2 – Atelier pièces métalliques

Atelier presse «C» : Son rôle consiste au pliage des pièces et leurs assemblage avec soudure, l'atelier ce compose de deux chaînes :

* Chaine armoire «Ca» : à partir d'une feuille métallique fournie par l'atelier refendage, on fabrique une armoire pour congélateur 220F.
* Chaine porte «Cb» : à partir d'une feuille métallique fournie par l'atelier refendage, on fabrique une porte pour congélateur 220F.

Atelier presse « C »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
C_{a_1}	*Encochage et poinçonnage	0.57
C_{a_2}	Pliage en « L »	0.57
C_{a_3}	Pliage en « z »	0.57
C_{a_4}	Pliage en « u »	0.57
C_{a_5}	Soudure de la plaque arrière	0.47
C_{a_6}	Soudure de la plaque avant	0.47
C_{a_7}	Soudure de l'angle	0.32
C_{a_8}	Soudure du renfort de font	0.34
C_{a_9}	Soudure de la plaque de font	0.47
$C_{a_{10}}$	Soudure du renfort de charniers	0.34
$C_{a_{11}}$	Peinture	2.91
C_{b_1}	*Poinçonnage de la tôle pour porte	0.42
C_{b_2}	Emboutissage	0.60
C_{b_3}	Pliage de la porte	0.57
C_{b_4}	Peinture de la porte	2.91

Cet atelier permet de transformer la tôle provenant de l'atelier refendage par le billet des presses hydrauliques et soudure en suivant des étapes précises, illustrer par le graphe PERT suivant :

- $S(C) = (C_{a1}; C_{a2}; C_{a3}; C_{a4}; C_{a5}; C_{a6}; C_{a7}; C_{a8}; C_{a9}; C_{a10}; C_{a11})$
- $Dp(C) = 7,6min$

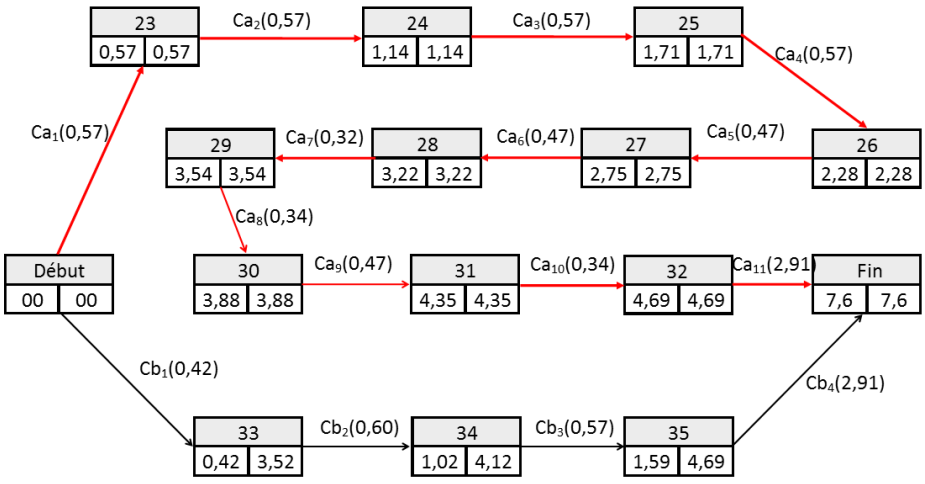

FIGURE 3.3 – Atelier presse

Atelier peinture : C'est le revêtement des pièces avec peinture après plusieurs traitements de surface avec des produit chimique, cet atelier est composé de trois chaînes principales :

* Chaine armoire et chaine porte
* Chaine évaporateur
* Chaine condenseur

Remarque 3.1. *Les même opérations de peinture pour l'évaporateur, le condenseur, la porte et l'armoire du congélateur 220F, c'est juste le bain et la température de séchage qui diffère.*

Atelier plastique «D» : Dans cet atelier on fabrique les différentes pièces en plastique et en styropor, par deux méthodes :

* fabrication des pièces par expansion :
  - Les bouchons de l'avant moussage «Da»
  - Les pièces d'emballages «Db»
* fabrication par la technique d'injection :
  - Fabrication des fixateurs "A" et "B" pour les tiroirs «Dc»
  - Fabrication des tiroirs «Dd»
  - Fabrication du poignet de la porte «De»
  - Fabrication du portillon intérieur «Df»
  - Fabrication du moule a glaçon «Dg»

Atelier plastique « D »		
la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
D_{a_1}	*préparation de la matière premier pour expansion 1	0.35
D_{a_2}	Expanseur	1.75
D_{a_3}	Pièces finis 1	0.15
D_{b_1}	*préparation de la matière premier pour expansion 2	0.35
D_{b_2}	Séchage	10
D_{b_3}	découpe	0.22
D_{b_4}	Pièces finies 2	0.15
D_{c_1}	*préparation de la matière pour injection (fix A/B)	0.35
D_{c_2}	Injection et formage (fix A/B)	0.5
D_{c_3}	Pièces finies (fix A/B)	0.15
D_{d_1}	*préparation de la matière pour injection (tiroirs)	0.35
D_{d_2}	Injection et formage (tiroirs)	0.05
D_{d_3}	Pièces finies (tiroirs)	0.15
D_{e_1}	*préparation de la matière pour injection (poigner)	0.35
D_{e_2}	Injection et formage (poigner)	0.05

D_{e_3}	Pièces finies (poigner)	0.15
D_{f_1}	*préparation de la matière pour injection (portillon intérieur)	0.35
D_{f_2}	Injection et formage (portillon intérieur)	0.05
D_{f_f}	Pièces finies (portillon intérieur)	0.15
D_{g_1}	*préparation de la matière pour injection (moule a glaçons)	0.35
D_{g_2}	Injection et formage (moule a glaçons)	0.05
D_{g_3}	Pièces finies (moule a glaçons)	0.15

Le graphe suivant représente le cheminement des tâches de fabrication des différentes pièces plastique avec le réseau PERT, avec :

- $S(D) = (D_{b1}; D_{b2}; D_{b3}; D_{b4})$
- $Dp(D) = 10,72min$

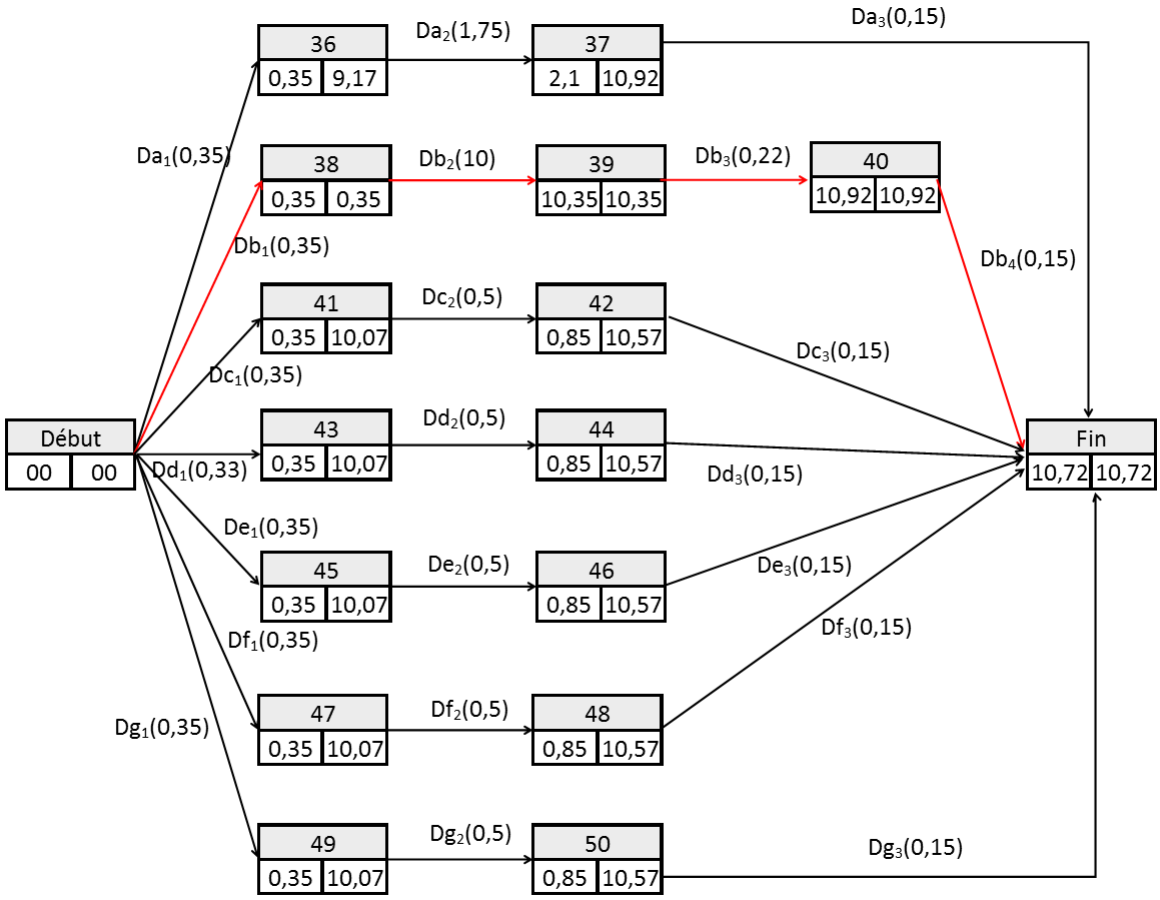

FIGURE 3.4 – Atelier plastique

Atelier thermoformage «E» : Cet atelier permet de fabriquer la cuve intérieur et la contre porte il est composé de 2 chaines de fabrication :

∗ Chaine cuve intérieur «Ea»

∗ Chaine contre porte «Eb»

Atelier thermoformage « E »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
E_{a_1}	*Chauffage de la feuille de HIS pour la contre porte	0.08
E_{a_2}	Formage sous vide 1	0.04
E_{a_3}	Refroidissement 1	0.1
E_{a_4}	Découpe/Finition 1	0.03
E_{b_1}	*Chauffage de la feuille de HIS pour la cuve intérieur	0.1
E_{b_2}	Formage sous vide 2	0.05
E_{b_3}	Refroidissement 2	0.16
E_{b_4}	Découpe/Finition 2	0.05

– $S(E) = (E_{b1}; E_{b2}; E_{b3}; E_{b4})$

– $Dp(E) = 0.36min$

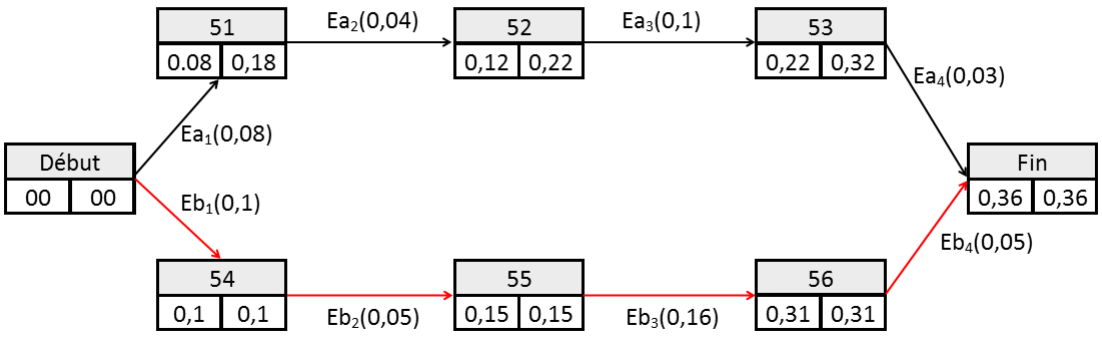

FIGURE 3.5 – Atelier thermoformage

Atelier urethan «F» : C'est dans cet atelier qu'on assemble la cuve intérieure avec l'armoire, est on ajoute plusieurs pièces plastique avant de mousser le tous.

Atelier uréthane « F »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
F_1	*Placer les différents bouchons pour armoire	0,91
F_2	Placer la gaine électrique	1.75
F_3	Fixation des fixateurs A/B	01
F_4	Insertion de la cuve intérieur dans l'armoire	0.5
F_5	Ajout des pieds avants	0.75
F_6	Insertion du réchauffeur anti-condensation	1
F_7	Moussage	9.79

Cet atelier est composé d'une seule chaine de production alors son chemin critique est la chaine elle-même.

- $S(F) = (F_1; F_2; F_3; F_4; F_5; F_6; F_7)$
- $Dp(F) = 15,7min$

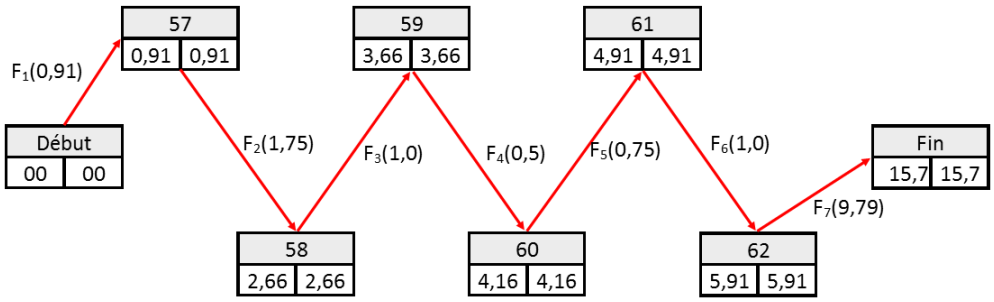

FIGURE 3.6 – Atelier uréthane

Chaîne de prés-montage compresseur «H» : C'est l'atelier ou s'effectue la préparation du compresseur pour le montage final.

Chaine de prés-montage compresseur « H »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
H_1	Fixé les fils de masse 200454	0.75
H_2	Mettre en place et connecter les fils	0.75
H_3	Mettre en place faisceaux électrique	0.75
H_4	Mise en place des 4 rondelles	0.5
H_5	Fixer les 4 circlips	0.85
H_6	Emboiter les tubes queue	0.5
H_7	Braser les tube ci-dessus	1
H_8	Mettre les bouchons 20205	0.25

- $S(H) = (H_1; H_2; H_3; H_4; H_5; H_6; H_7; H_7)$
- $Dp(H) = 5min$

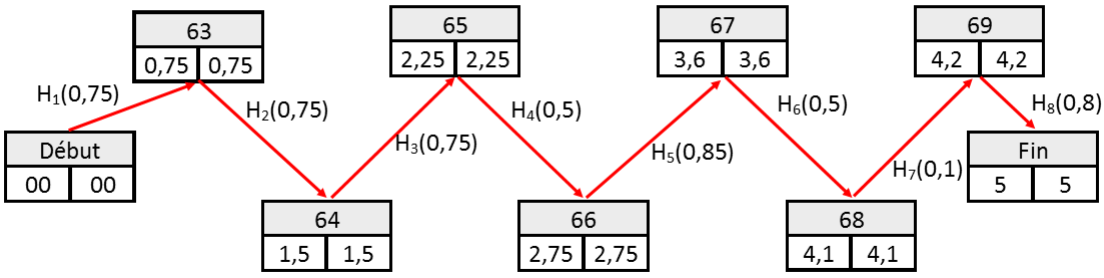

FIGURE 3.7 – Atelier pré-montage compresseur

Chaine porte «I» : C'est l'atelier ou s'effectue l'assemblage de la porte et de la contre porte et autre accessoires et mousser le tous.

Chaine porte « I »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
I_1	Montage de la contre porte	0.5
I_2	Montage du poignée de porte	0.33
I_3	Moussage de la porte	7
I_4	Montage du joint de fermeture	1

Cet atelier est composer d'une seul chaine se qui fais que sont chemin critique est la chaine elle même.

- $S(I) = (I_1; I_2; I_3; I_4)$
- $Dp(I) = 8,83min$

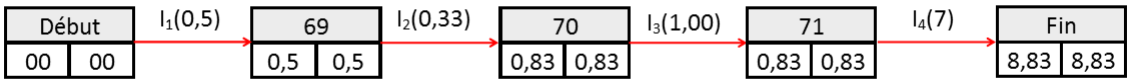

FIGURE 3.8 – Chaine porte

Atelier appartenant à la chaîne principal

Atelier montage final «G» : C'est dans cet atelier qu'on assemble toutes les pièces provenant des ateliers de préfabrication.

Atelier de montage final « G »		
Repère de la tâche	**Description de la tâche**	**Durée en (min)**
G_1	Montage du boitier thermostat	0.77
G_2	Montage évaporateur	2.7
G_3	Montage support bulbe	0.55
G_4	Montage base compresseur	0.39
G_5	Montage du compresseur	0.41
G_6	Montage du support condenseur	0.39
G_7	Montage du condenseur	0.17
G_8	Montage du filtre	0.49
G_9	Poste de contrôle par échantillon	0.66
G_{10}	Mise à vide	3.75
G_{11}	Injection du gaze de refroidissement	0.33
G_{12}	Soudure du tube compresseur	0.5
G_{13}	Entrer en salle d'essai	5.5
G_{14}	Fixation charnier inférieur	0.4
G_{15}	Montage de la porte	0.17
G_{16}	Montage charnier supérieur	0.4
G_{17}	Montage du moule a glaçons	0.34
G_{18}	Montage du portillon intérieur	0.06
G_{19}	Montage des tiroirs	0.19

G_{20}	Nettoyage avec produit	1
G_{21}	Poste d contrôle	0.5
G_{22}	Ajout de plusieurs carte et certificat	0.75
G_{23}	emballage	2.5

- $S(G) = (G_1; G_2; G_3; G_4; G_5; G_6; G_7; G_8; G_9; G_{10}; G_{11}; G_{12}; G_{13}; G_{14}; G_{15}; G_{16}; G_{17}; G_{18}; G_{19}; G_{20}; G_{21}; G_{22}; G_{23})$
- $Dp(C) = 22,92min$

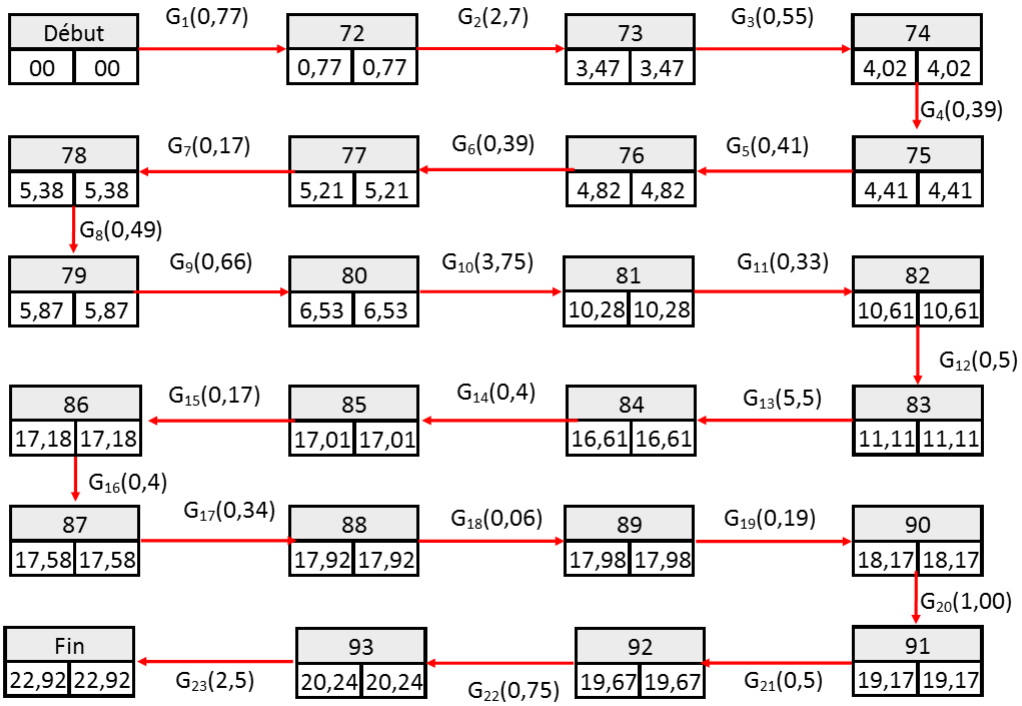

FIGURE 3.9 – Atelier montage final

Modélisation de toutes les étapes de fabrication du 220F

Le tableau suivant illustre tous les prédécesseurs des taches, et les niveaux pour construire un graphe MPM.

tâche	prédécesseur (N0)	(N1)	(N2)	(N3)
A_a	-			
A_b	-			
B_a	-			
B_b	-			
B_c	-			
B_d	-			
C_a	A_a	-		
C_b	A_b	-		
D_a	-			
D_b	-			
D_c	-			
D_d	-			
D_e	-			
D_f	-			
D_g	-			
E_a	-			
E_b				
F	C_a ;D_a ;D_c ;E_b	C_a	-	
H	-			
I	C_b ;D_e ;E_a	C_b	-	
G	B_a ;B_b ;B_c ;B_d ;D_b ;D_d ;D_f ;D_g ;F ;H ;I	F ;I	F ;I	-
Niveaux	A_a ;B_a ;B_b ;B_c ;B_d ;D_a ;D_b ;D_c ;D_d ; D_e ;D_f ;D_g ;E_a ;H ;E_b ;A_b	C_a ;C_b	F ;I	G

Après le calcule des chemins critiques grasse a l'algorithme de Bellman de tous les ateliers, et des dates au plus tôt et au plus tard, ainsi que les niveaux dans le tableau précédent avec l'algorithme de mise en ordre d'un graphe, nous avons construit un graphe MPM qui renvoi toutes les étapes de fabrication du congélateur 220F avec :

- $S = (A_a; C_a; F; G)$
- $Dp = 62,38min$

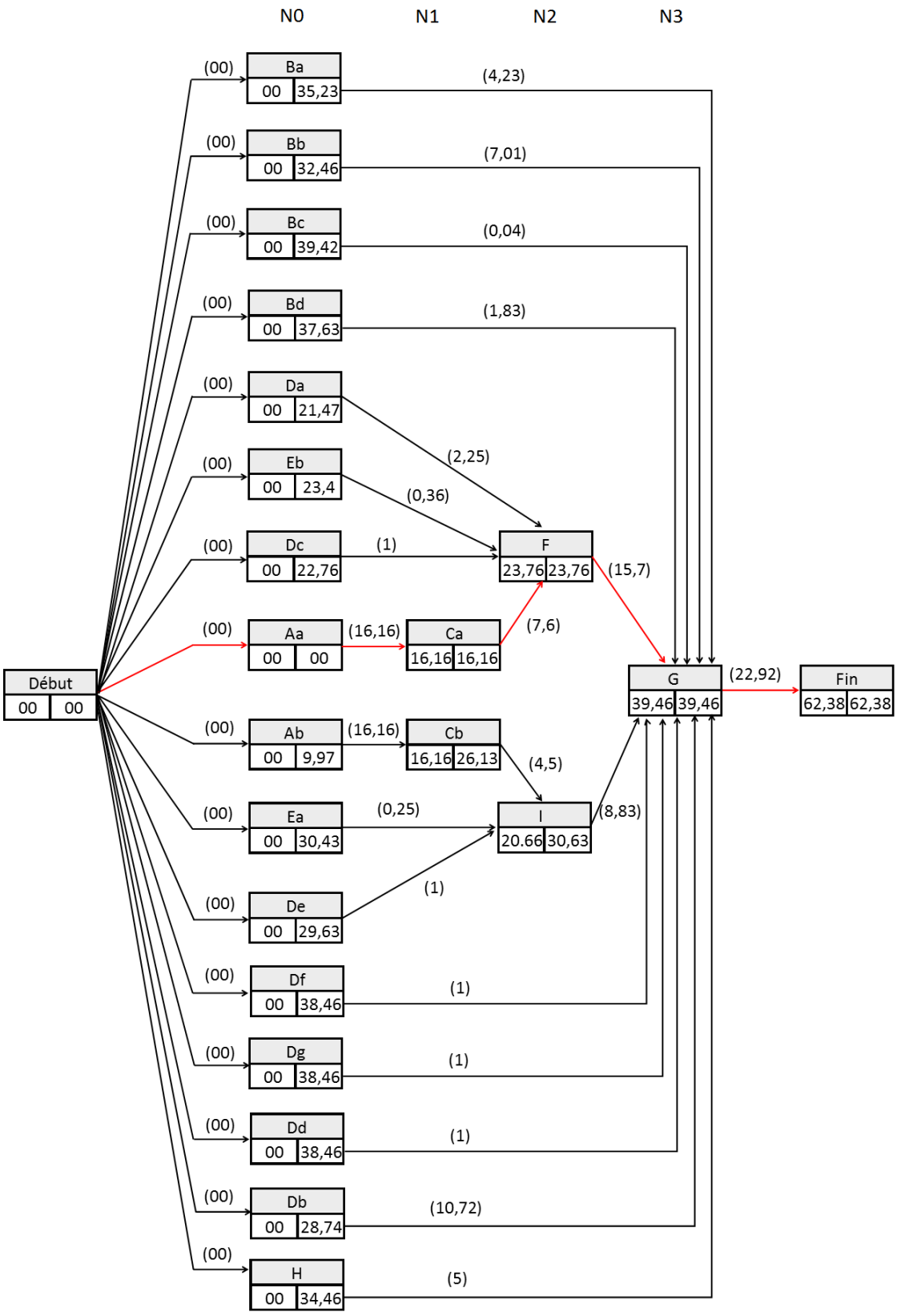

FIGURE 3.10 – Réseau MPM qui correspond au projet complet

3.2.2 Modélisation mathématique

En premier lieu nous devons construire le modèle linéaire le plus simple, qui cherche seulement à calculer la durée minimale du projet. Le modèle comprend les variables de décision suivantes :

Soit une tache J et son successeur immédiat J'.
- $d(j)$: Instant où débute la tâche j.
- $d(j')$: Instant où débute la tâche j'.
- D_j : Durée de la tâche j.
- $D(p)$: Durée de projet.

L'objectif consiste ici à minimiser la durée du projet :

$$MinZ = D(p)$$

Les contraintes du modèle se regroupent en deux catégories :
- Si j est prédécesseur immédiate de j', alors j' ne peut démarrer avant la fin de j :

$$d(j') \geq d(j) + D_j \tag{3.1}$$

- Si j n'admet aucun successeur, alors :

$$D(p) \geq d(j) + D_j \tag{3.2}$$

Le modèle linéaire correspondant est :

$$\begin{cases} MinZ = D(p) \\ -d(j) + d(j') \geq D_j \\ -d(j) + D(p) \geq D_j \\ d(j) \geq 0, d(j') \geq 0, D(p) \geq 0. \end{cases} \tag{3.3}$$

En utilisant le logiciel LINGO, qui est une application de modélisation linéaire, nous avons pu établir un modèle mathématique des étapes de fabrication du 220F qui est le suivant :

$min = Dp;$
$G - Ba >= 4.23;$
$G - Bb >= 7.01;$
$G - Bc >= 0.04;$
$G - Bd >= 1.83;$

$G - Df >= 1;$
$G - Dg >= 1;$
$G - Dd >= 1;$
$G - Db >= 10.72;$
$G - H >= 5;$
$G - I >= 8.83;$
$G - f >= 15.7;$
$F - Da >= 2.25;$
$F - Eb >= 0.36;$
$f - Dc >= 7;$
$F - Ca >= 7.6;$
$I - Cb >= 4.5;$
$I - Ea >= 0.25;$
$I - De >= 1;$
$Ca - Aa >= 16.16;$
$Cb - Ab >= 16.16;$
$Dp - G >= 22.92;$

$Aa >= 0;$
$Ab >= 0;$
$Ba >= 0;$
$Bb >= 0;$
$Bc >= 0;$
$Bd >= 0;$
$Ca >= 0;$
$Cb >= 0;$
$Da >= 0;$
$Db >= 0;$
$Dc >= 0;$
$Dd >= 0;$
$De >= 0;$
$Df >= 0;$
$Dg >= 0;$
$Ea >= 0;$
$Eb >= 0;$
$F >= 0;$
$G >= 0;$
$H >= 0;$

$I >= 0;$

$DP >= 0;$

Après le calcule et exécution du programme on a obtenu les résultats suivants :

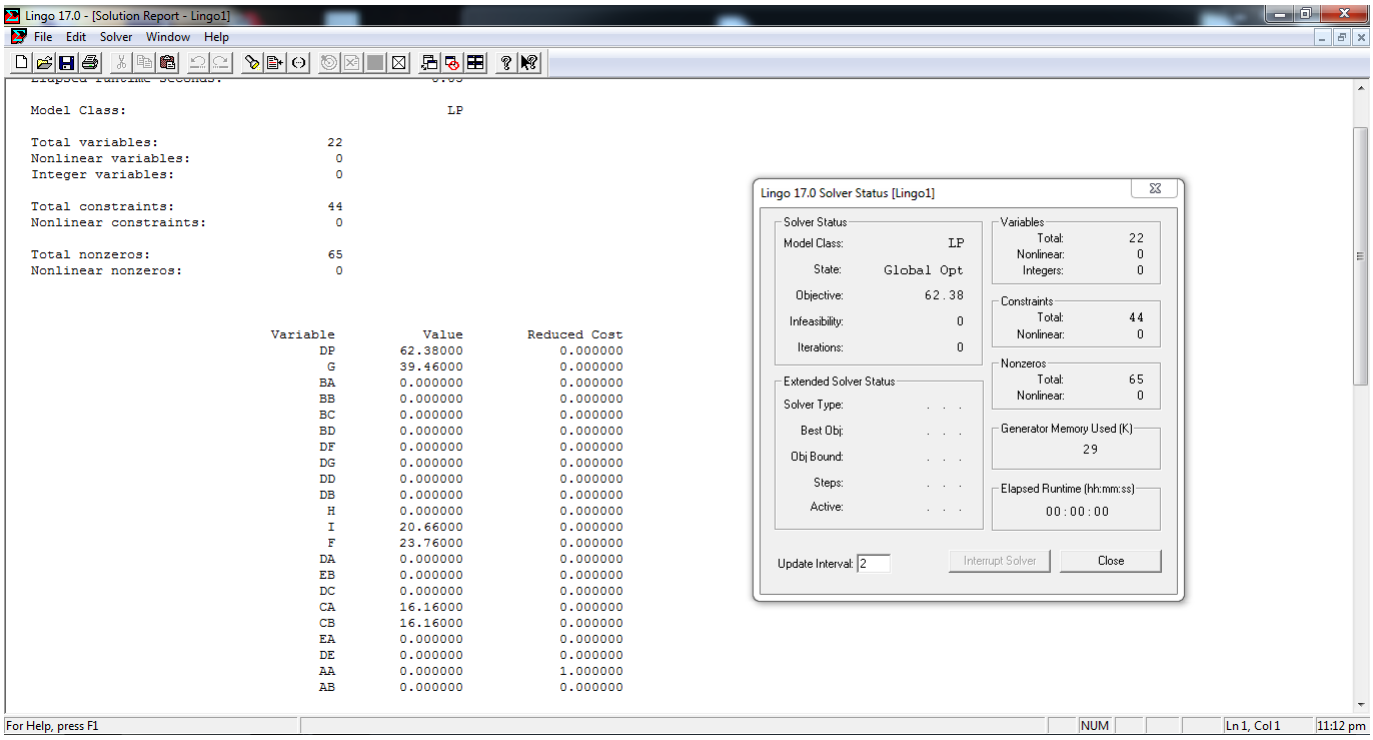

FIGURE 3.11 – Logiciel LINGO

D'après la figure 3.11 on remarque que le programme nous a donné les dates au plus tôt, par exemple la date au plus tôt de $F = 29.76min$, et la durée de fin du projet qui est $Dp = 62,38min$.

3.3 Conclusion

Après avoir modélisé graphiquement et mathématiquement les ateliers de fabrication du 220F, on a pu définir les durées au plus tôt, au plus tard de chaque tâche, ainsi que la durée globale de fin du projet qui est de 62,38 min.

Chapitre 4

Méthodes de résolution

Plusieurs spécialistes à savoir P. Lopez et G. Cavory ont distingué essentiellement deux classes de méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement :

- Les méthodes de résolution exactes permettant de donner des solutions optimales en un temps polynomial avec une taille limitée du problème.
- Les méthodes approchées dont les heuristiques et les méta-heuristiques qui donnent des solutions approchées en un temps raisonnable.

Pour les méthodes exactes, on a distingué trois sous classes dont la procédure par séparation et évaluation (Branch and Bound), la programmation dynamique et la programmation linéaire. Bien que ces méthodes fournissent des solutions optimales, leurs performances notamment en ce qui concerne le temps de calcul diminue proportionnellement avec la taille des problèmes.

Les méthodes approchées toutefois ne donnent aucune garantie d'optimalité mais elles demeurent les plus utilisées pour la majorité des problèmes d'ordonnancement et la plus part des spécialistes ont orienté leurs recherche vers le développement des méthodes heuristiques.

Les méthodes approchées englobent les heuristiques et les méta-heuristiques, Y. Harrath définie ces termes comme suit : «Une heuristique est une méthode de calcul pour un problème générique d'optimisation produisant une solution non nécessairement optimale. Par contre, une méta-heuristique est un ensemble de concepts applicables à un large ensemble de problèmes d'optimisation combinatoire pour créer de nouvelle heuristiques».[10]

4.1 Les méthodes exactes

4.1.1 La programmation linéaire

C'est un outil d'optimisation très puissant qui permet de résoudre un grand nombre de modèles linéaires. Son utilisation demande que le problème posé puisse se ramener à l'optimisation d'une fonction de forme linéaire, en respectant un ensemble de contraintes elles aussi linéaires, fonctions des mêmes variables positives ou nulles. Des contraintes très

variées peuvent être ajoutées de la même façon. L'étape de modélisation du problème peut s'avérer difficile, et la résolution d'un programme linéaire complexe peut demander un temps relativement long. Parmi les logiciels de résolution des problèmes de programmation linéaire, on peut citer LP-Solve, Cplex, Mosel-Xpress (qui est aussi un langage de modélisation et de résolution des problèmes d'optimisation).[12]

4.1.2 La programmation dynamique

C'est une méthode d'optimisation introduite par Bellman en, 1957. Cette méthode est basée essentiellement sur la décomposition du problème en une série de sous-problèmes reliés entre eux par une relation de récurrence permettant de décrire la valeur optimale du critère à une étape donnée en fonction de sa valeur à l'étape précédente. La solution optimale du problème est obtenue en calculant les solutions des sous-problèmes les plus petits, pour ensuite en déduire petit à petit les solutions du problème complet. Elle est par exemple utilisée pour développer des algorithmes polynomiaux et pseudo polynomiaux pour résoudre les problèmes à une machine et à machines parallèles).[12]

4.1.3 La méthode branch and bound

L'algorithme Branch and Bound consiste à placer progressivement les tâches sur les ressources en explorant un arbre de recherche décrivant toutes les combinaisons possibles. Il s'agit de trouver la meilleure configuration donnée de manière à élaguer les branches de l'arbre qui conduisent à de mauvaises solutions. L'algorithme branch and bound effectue une recherche complète de l'espace des solutions d'un problème donné, pour trouver la meilleure solution. La démarche de l'algorithme Branch and Bound consiste à :

- diviser l'espace de recherche en sous espaces,
- chercher une borne minimale en terme de fonction objectif associée à chaque sous espace de recherche,
- éliminer les mauvais sous-espaces,
- reproduire les étapes précédentes jusqu'à l'obtention de l'optimum global. [4]

4.2 Méthode approchées

4.2.1 Les Méta-heuristiques (Les méthodes d'amélioration)

Malgré l'évolution permanente de l'informatique, il existe toujours, pour un problème polynomial, une taille critique au-dessus de laquelle une énumération, même partielle, des solutions admissibles devient prohibitive. Compte tenu de ces difficultés, la plupart des spécialistes de l'optimisation combinatoire ont orienté leurs recherches vers le développement des

méta-heuristiques. Une méta-heuristique est souvent définie comme une procédure exploitant au mieux la structure du problème considéré, dans le but de trouver une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul aussi faible que possible. Les méta-heuristiques sont ainsi des méthodes de recherche générales, dédiées aux problèmes d'optimisation difficile. Elles sont, en général, présentées sous forme de concepts. Les principales méta-heuristiques sont celles basées sur la recherche locale, telles que le recuit simulé et la recherche Tabou, et celles basées sur les algorithmes évolutionnistes telles que les algorithmes génétiques ainsi que les algorithmes basés sur la recherche globale tels que les algorithmes de colonies de fourmis et les algorithmes reposant sur la méthode d'optimisation par essaim de particules

4.2.2 Les Heuristiques (Les méthodes constructives)

Les méthodes heuristiques sont les plus utilisées pour la majorité des problèmes d'ordonnancement, et elles semblent être la seule approche de résolution des problèmes de grande taille. Les travaux sont nombreux, nous ne rappelons ici que ceux qui ont influencé nos travaux, sont la méthode de Johnson et NEH (Nawaz-Enscore-Ham).

Heuristique de Johnson

- **Algorithme de Johnson pour la résolution de** $F2\|C_{max}$

  On a à minimiser n job à travers 2 machines ; chaque job selon l 'ordre suivant M_1, M_2 et à minimiser le temps maximum de séjour dans l'atelier C_{max}
  Remarquons que $F_{max} = C_{max}$ puisque $R_i = 0$.
  Le principe consiste à exécuter e premier les jobs, selon l'ordre croissant des temps de traitement sur M_1, Ce qui permet de débuter le traitement su M_2 le plutôt possible. les jobs restants sont ordonnancés suivant l'ordre décroissant des temps de traitement sur M_2
- **Algorithme :**

  Notons par $a_i = P_{i,1}$ le temps de traitement du job i sur la machine M_1.
  $b_i = P_{i,2}$ le temps de traitement du job i sur la machine M_2.

  L'algorithme construit une séquence de traitement, en travaillant de la fin vers le milieu. On utilisera deux compteur k et l, k est initialisé à 1 et s'incrémente une fois que les positions dans la séquence se remplisse, l par contre prend comme valeur initiale n et se décrémente de la même façon que k.
  1/ posons $k = 1$ et $l = n$
  2/ poser les jobs dans un ensemble $= \{J_1, J_2, ..., J_n\}$
  3/ trouver les plus petit des a_i et b_i de l'ensemble précédent
  4/ si le plus petit temps des J_i est sur la premier machine alors :

- ordonner J_i à la $k^{ème}$ position dans la séquence de traitement
- ôter J_i de la liste des jobs
- incrémenter $k; k = k + 1$
- aller à 6

5/ si le plus petit temps des J_i est sur la deuxième machine alors :

- ordonner J_i à la $l^{ème}$ position dans la séquence de traitement
- ôter J_i de la liste des jobs
- incrémenter $l; l = l - 1$
- aller à 6

6/ s'il reste des jobs dans la liste aller à 3 si non stop.

L'algorithme de JOHNSON donne un ordonnancement optimal pour le problème$F2\|C_{max}$.

– **Problème** $F3\|C_{max}$

L'algorithme de Johnson qui résout le Problème $F2\|C_{max}$ peut être étendue au problème $F3\|C_{max}$ où la machine 2 est dominée, cette notion de dominance est caractérisée par l'une des inégalités suivantes

$$min\{p_{i1}\} \geq max\{p_{i2}\}$$

où

$$min\{p_{i3}\} \geq max\{p_{i2}\}$$

Si une de ces deux relations est satisfaite, alors un ordonnancement optimal peut être trouvé en posant :

$$a_i = p_{i1} + p_{i2}$$
$$b_i = p_{i2} + p_{i3}$$

En appliquant la règle de johnson pour les temps de traitement égale à a_i et b_i sur les deux machines $M_1^{'}$ et $M_2^{'}$ respectivement, on génère un ordonnancement optimal pour le problème $F3\|C_{max}$ [9]

Heuristique NEH

NEH (Nawaz-Enscore-Ham) est une heuristique très connue pour la résolution des problèmes d'ordonnancement de type flowshop. Le principe est le suivant :

– Trier les jobs par $\sum_{j=1}^{m}(C_{i,j})$ croissant
– Ordonnancer les deux premiers travaux dans l'ordre minimisant le C_{max}
– Ensuite, prendre chaque autre travail dans la liste triée et l'insérer à la meilleure position pour la minimisation duC_{max} dans l'ordonnancement partiel.[11]

Chapitre 5

Application

5.1 Introduction

Après avoir présenté les méthodes de résolution, dans ce chapitre on s'est penché sur un cas pratique, celui de la chaîne de fabrication de clayettes (5 types de clayette), chaque clayette (job) passe par trois machines, la machine de découpe ($M1$), la machine de soudure ($M2$), et celle de la finition ($M3$).
On remarque que ce type d'ordonnancement est un ordonnancement de type Flow-shop à trois machines et cinq Jobs ($F3 \parallel C_{max}$), notre but est d'organiser l'ensemble des 5 tâches sur les 3 machines de telle sorte à optimiser et à minimiser la durée de fin de projet, pour cela on a opté pour les méthodes heuristiques qui sont les plus utilisées pour résoudre la majorités des problèmes d'ordonnancement :

- L'heuristique de JOHNSON
- L'heuristique NEH (Nawaz-Enscore-Ham)

5.2 Choix de la méthode

La recherche de l'optimalité impose à mesurer la qualité d'une solution, pour cela de nombreuse recherches et beaucoup d'essais de méthodes ont eu lieu. Vue la complexité de ce problème qui augmente si on augmente le nombre de machine, on a choisis de réduire ce nombre a trois machines, donc nous avons utilisé des heuristique qui sont des procédure de calcul qui conduit à une solution dont on peut calculer l'écart maximal à l'optimum.

5.3 Interprétation des données

Le tableau suivant représente les durées de réalisation de chaque tâches (J) dans une machine (M) en secondes.

	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
M_1	78,3	57,2	41,67	33,2	50,66
M_2	150,89	124,85	46,17	11.12	60,9
M_3	10,21	13,3	8,05	6.55	9,25

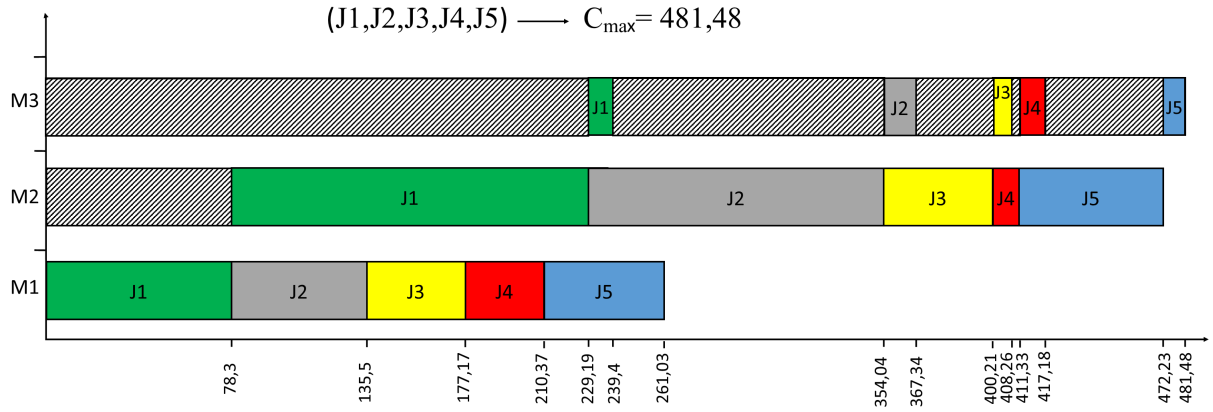

FIGURE 5.1 – Diagramme de GANTT représentant l'enchainement et la durée de réalisation des 5 jobs

5.4 Application des algorithmes

5.4.1 Algorithme de Johnson

L'algorithme de Johnson ne s'applique qu'en présence de deux machines. Cependant, le cas de trois machines peut se ramener au cas de deux machines si la machine M_2 est complètement dominée par la machine M_1 ou par la machine M_3, c'est-'a-dire si l'on se trouve dans le cas où

$$\boxed{MinJ_jM_1 \geq MaxJ_jM_2}$$

soit dans le cas où

$$\boxed{MinJ_jM_3 \geq MaxJ_jM_2}$$

Ces conditions évitent de fausser l'algorithme de Johnson, dans le cadre des données ci-dessus. Hélas d'après nos données nous avons :

$$MinJ_jM_1 = 33.2 \not\geq MaxJ_jM_2 = 150.89 \qquad \text{pour } j = 1, ..., n$$

et

$$MinJ_jM_3 = 6.55 \not\geq MaxJ_jM_2 = 150.89 \qquad \text{pour } j = 1, ..., n$$

Aucune des deux conditions de dominance n'est vérifiés donc on ne peut appliqué la méthode de johnson.

5.4.2 Algorithme NEH

	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
M_1	78,3	57,2	41,67	33,2	50,66
M_2	150,89	124,85	46,17	11.12	60,9
M_3	10,21	13,3	8,05	6.55	9,25
$\sum_{j=1}^{m} P_{i,j}$	239,4	195,35	95,89	50.87	120,81

$n = 5$ jobs ; $m = 3$ machines

Le tris au début se fait par ordre croissant

$j_4 \quad j_3 \quad j_5 \quad j_2 \quad j_1$

*** $1^{ére}$ itération :**

Sélectionner J_3 et J_4, trouver la meilleure séquence des deux jobs.

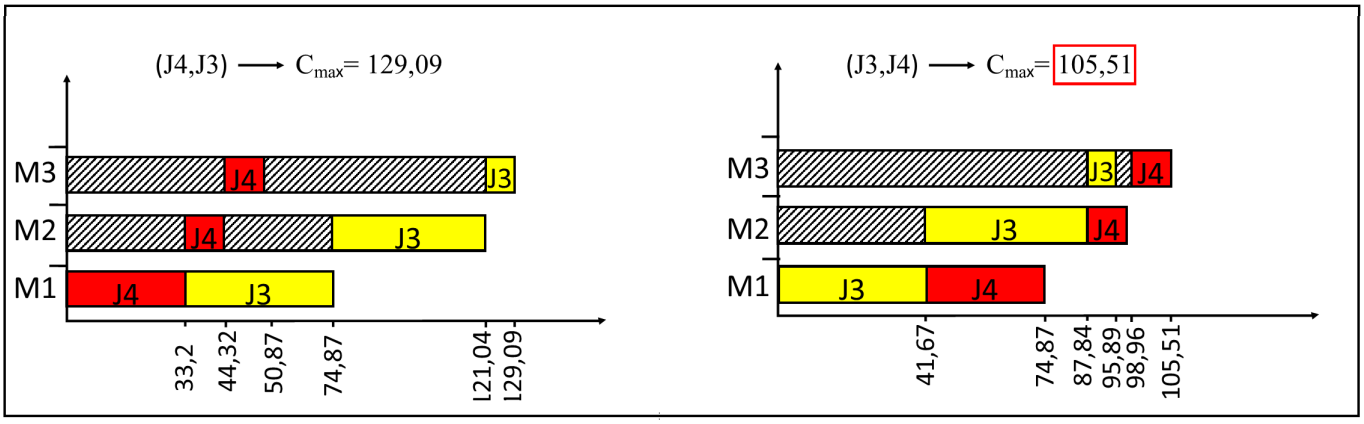

FIGURE 5.2 –

- $(J_4, J_3) \Rightarrow C_{max} = 129.09$
- $(J_3, J_4) \Rightarrow C_{max} = \boxed{105.51}$

*** 2^{eme} itération :**

On fixe l'ordre de J_3 etJ_4 et on permute J_5

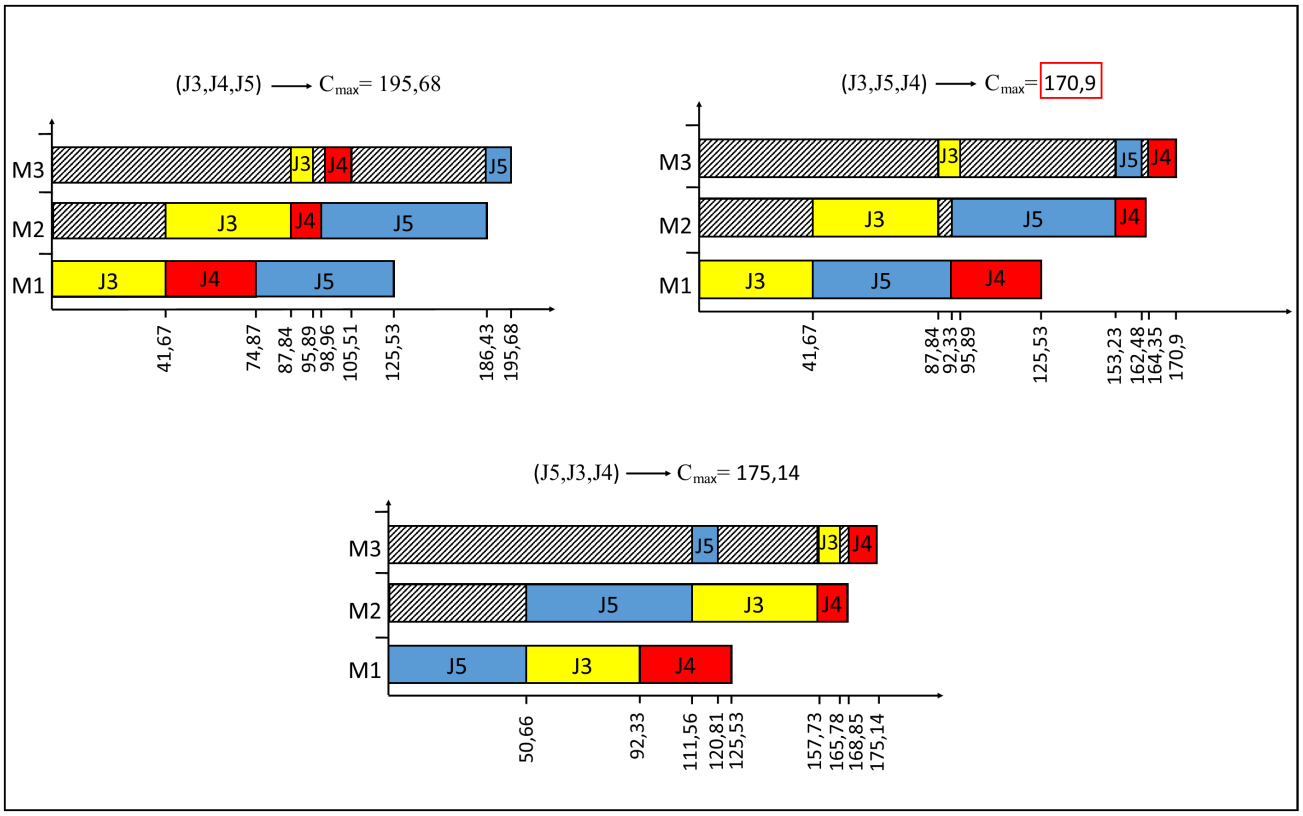

FIGURE 5.3 –

- $(J_3, J_4, J_5) \Rightarrow C_{max} = 195.68$
- $(J_3, J_5, J_4) \Rightarrow C_{max} = \boxed{170.9}$
- $(J_5, J_3, J_4) \Rightarrow C_{max} = 175.4$

*** 3^{eme} itération :**

On fixe l'ordre de J_3,J_4 et J_5 et on permute J_2

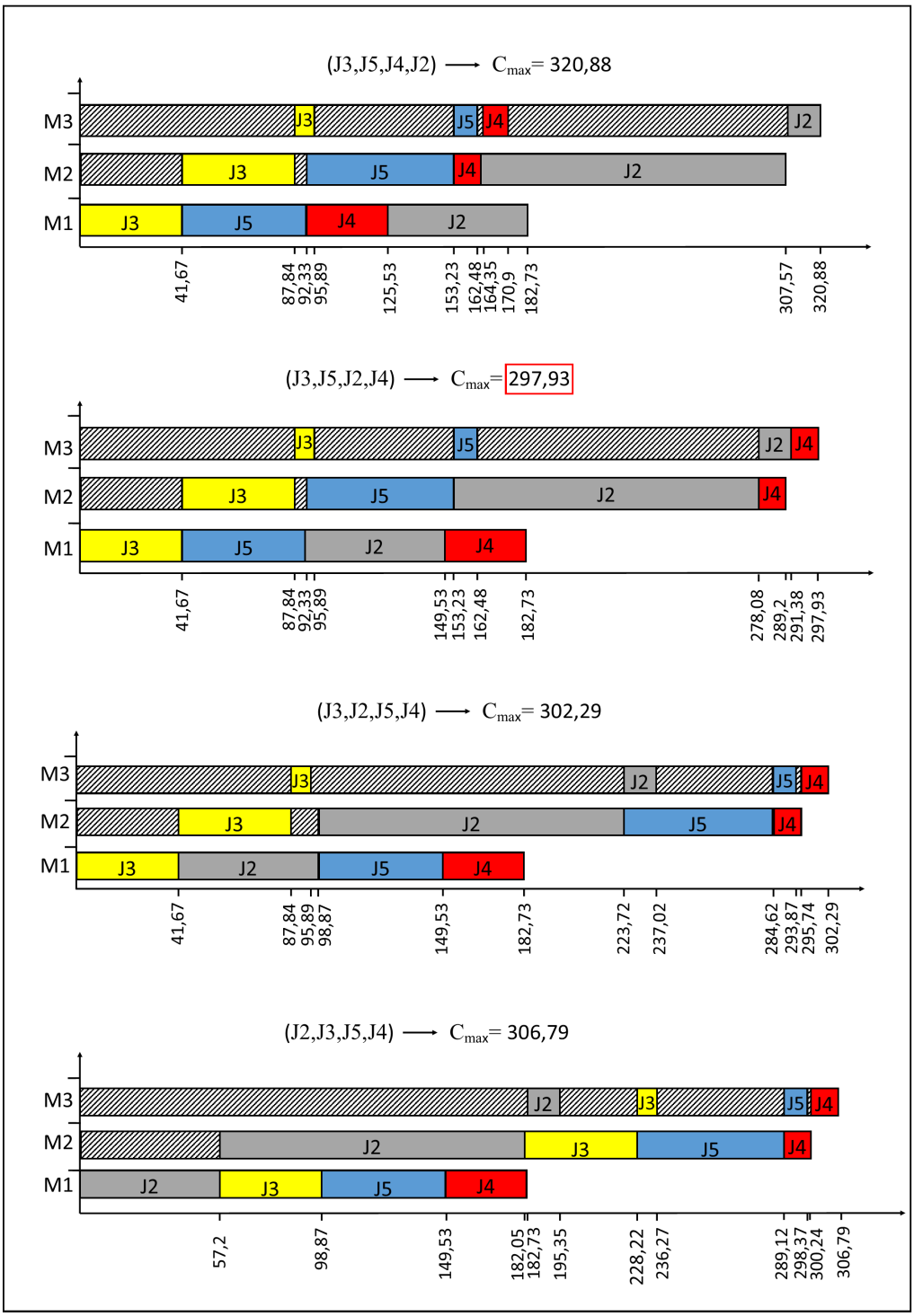

FIGURE 5.4 –

- $(J_3, J_5, J_4, J_2) \Rightarrow C_{max} = 320.88$
- $(J_3, J_5, J_2, J_4) \Rightarrow C_{max} = \boxed{297.93}$
- $(J_3, J_2, J_5, J_4) \Rightarrow C_{max} = 302.29$
- $(J_2, J_3, J_5, J_4) \Rightarrow C_{max} = 306.79$

***** 4^{eme} **itération :**

On fixe l'ordre de J_3,J_4, J_5 et J_2 et on permute J_1

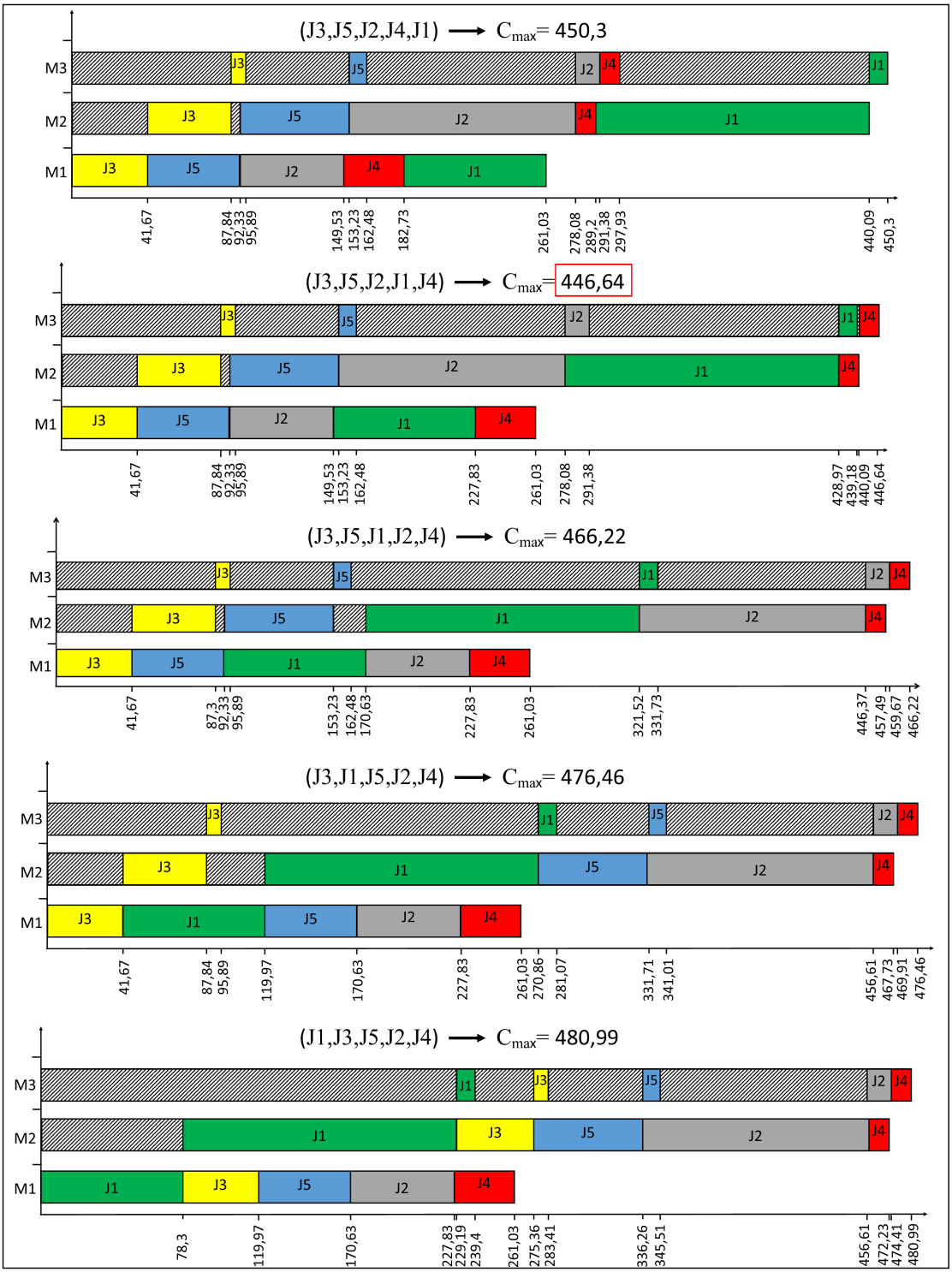

FIGURE 5.5 –

- $(J_3, J_5, J_2, J_4, J_1) \Rightarrow C_{max} = 450.3$
- $(J_3, J_5, J_2, J_1, J_4) \Rightarrow C_{max} = \boxed{446.64}$
- $(J_3, J_5, J_1, J_2, J_4) \Rightarrow C_{max} = 466.22$
- $(J_3, J_1, J_5, J_2, J_4) \Rightarrow C_{max} = 476.46$
- $(J_1, J_3, J_5, J_2, J_4) \Rightarrow C_{max} = 480.41$

5.5 Interprétation des résultats

La figure 5.1 nous renvoie la durée de fin du projet, c'est à dire que les 5 jobs seront terminés dans 481,48 s.
L'entreprise travaille 7,5 heures par jour équivaut à 27000 s, alors le nombre de clayette à produire est :

$$Np = \frac{27000}{481.48} \times 5 = 280 \text{ pièces}$$

Après l 'application de l 'algorithme NEH, on a :

$$Np^{opt} = \frac{27000}{446.64} \times 5 = 302 \text{ pièces}$$

Le nombre de pièces à gagner est de :

$$Np^{opt} - Np = 22 \text{ Pièces}$$

Donc au début il y avait une cadence de 280 p/j et après application de l'algorithme on a pu optimiser la production jusqu'à une cadence de 302 p/j. Alors le gain est de 22 p/j.

5.6 NEH improvement

Dans certain cas la solution obtenue sur un problème flow-shop par la méthode NEH peut être améliorée, pour cela on peut s'appuyer sur la méthode NEH itérative. Le principe est simple : on applique cette méthode à partir de la séquence précédemment obtenue avec l'algorithme NEH itérative, au lieu de partir d'une séquence composée des jobs triés par le temps d'exécution croissant.[11]

Algorithme NEH itérative

DONNÉE : n =Nombre de travaux
1 : Soit $J \leftarrow (j_1, j_2 ... j_n)$ l'ordonnancement des jobs obtenus par l'heuristique NEH
2 : C_{pmax} : entier représentant le C_{max} le plus petit connu lors du placement d'un job
3 : **TANTQUE** Amélioration du makespan **FAIRE**
4 : Mise à jour de l'ordre des jobs à placer qui sont dans J
5 : **POUR** i DE 1 À n **FAIRE**
6 : On sélectionne le job j_i dans J
7 : $C_{pmax} \leftarrow \infty$
8 : **POUR** k DE 1Àn **FAIRE**
9 : On place le job j_j à la position k dans la séquence $J_{partielle}$ sans changer l'ordre
. relatif des autres jobs déjà placés
10 : Calcul de C_{max} de la séquence $J_{partielle}$
11 : **SI** $C_{max} < C_{pmax}$ **ALORS**
12 : $Best_k \leftarrow k$
13 : $C_{pmax} \leftarrow C_{max}$
14 : **FIN SI**
15 : **FIN POUR**
16 : On place le job j_i à la position $Best_k$ dans J
17 : **FIN POUR**
18 : **FIN TANTQUE**
19 : **RETOURNER** L'ordonnancement de la séquence donnant le plus petit makespan

5.7 Conclusion

Ce travail nous permet de constater que ces méthodes dans leur version standard, sont capable de fournir de précieux outils adaptés aux problèmes combinatoires industriels.
On aurait pu croire que des versions de base de cette heuristique auraient de la difficulté de fournir une bonne qualité de solution, mais au contraire les résultats obtenus montrent que cette méthode (simple) est parvenue à des solutions pratiquement très satisfaisantes.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons étudier un cas particulier de problème d'atelier, qui est l'ordonnancement FLOW-SHOP dont on a évalué un critère qui est la minimisation de la durée de fin d'exécution C_{max} de toutes les tâches dans un atelier.

Comme ce type de problème est rencontré fréquemment en pratique dans le montage (chaine de fabrication), nous sommes intéressés à l'étudier, le définir et le modéliser sous forme graphique et linéaire, de sorte à donner une écriture simplifiée de toutes les données du problème, cette modélisation nous permet d'en traduire tous les délais pour mieux représenter les étapes de montage comme c'est le cas dans le chapitre 3.

Ensuite nous avons pu réduire la durée de fin de projet grâce à la modélisation par le diagramme de GANTT, et une résolution du problème par l'heuristique NEH, comme le démontre le chapitre application.

Cependant, comme tout travail scientifique celui-ci n'est pas achevé. Des perspectives s'ouvrent sur de nouvelle vois de recherche, pour donner une méthode de résolution des problèmes pratiques et qui donne une solution fiable au cas développé.

Bibliographie

[1] **AIDER Kahina** et **ALI CHERIF Karima**, *« Ordonnancement de l'unité froid de l'ENIEM»*, thèse de Licence, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI. TIZI-OUZOU,2013.

[2] **Ali ALOULOU Mohamed**, *«Modélisation et résolution des problèmes d'ordonnancement»*, Livre, Université Paris Dauphine, October 25, 2006.

[3] **AMROUN Ouiza** et **FERHAOUI Karima**, *«Résolution d'un problème d'ordonnancement type flow shop par la méthode branch and bound »*, thèse de Licence UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI. TIZI-OUZOU,2013.

[4] **BOUKEF BEN OTHMAN Hela** , *«Sur l'ordonnancement d'ateliers job-shop flexibles et flow-shop en industries pharmaceutiques Optimisation par algorithmes génétiques et essaims particulaires»*, thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DE TUNIS EL MANAR, 2009.

[5] **BEN HMIDA Abir** , *«Méthodes arborescentes pour la résolution de problèmes d'ordonnancement fexible»*, thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 2009.

[6] **BOURZIK MOHAMMED** , *« Problèmes d'ordonnancement d'atelier »*, thèse de Licence, UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH, 2016.

[7] **DUPONT Daniel** et **Daniel Roux**, *«Techniques opérationnelles d'ordonnancement De Edmond Maurel»*, Annexe.

[8] **GHEROUFELA Samira** et **MISSOUM Baya**, *«Résolution de problèmes d'ordonnancement sur machines type flow shop cas ENIEM »*, thèse d'ingénieur d'état, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI. TIZI-OUZOU,2010.

[9] **KASDI Kamal** , *« Les problèmes d'ordonnancement on-line»*, thèse Magistère, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI. TIZI-OUZO, 2002.

[10] **KARIM HAJJI Mohamed** , *«Contribution à la résolution des problèmes de Flow Shop avec machines dédiées, avec dates de disponibilité et délais de livraison»*, Université de Sousse, 2012.

[11] **MAUGEAIS Mélanie** , *« Etude d'un flow shop pour minimiser le C_{max} sous diverses contraintes de blocage»*, Rapport de projet de fin d'étude, École Polytechnique de l'Université de Tours, 2013.

[12] **TRABELSI Wajdi** , *«Ordonnancement des systèmes de production flexibles soumis à différents types de contraintes de blocage»*, thèse de Doctorat, école doctorale IAEM Lorraine, 2012.

[13] «www.eniem.dz».

[14] **BELHARRAT.N et Collectif** , *« La recherche Opérationnelle, (théorie des graphes) »*, ALGERIE,Livre la pages blue, 2005.

Résumé

Parmi les problèmes rencontrés par le chercheur et l'ingénieur, les problèmes d'optimisation occupent à notre époque une place de choix. Formuler les problèmes d'optimisation et tenter de les résoudre représentent l'objectif principal de nombreux chercheurs.

Ce sujet de thèse concerne de manière générale la modélisation graphique des ateliers de fabrication de l'ENIEM, plus particulièrement l'unité froid par les méthodes MPM et PERT et aussi mathématiquement, dans le but de calculer les durées au plus tôt et au plus tard de chaque tâche, afin de définir la durée de fin de projet.

Le deuxième travail est d'optimiser la production d'un processus de fabrication des clayettes qui est une chaine de production au sein de l'atelier de fabrication des pièces métalliques. Qui est un atelier de type Flow shop.
Le problème d'ordonnancement d'un Flow-Shop peut être défini ainsi : un ensemble de n jobs composés chacun de m opérations, doivent passer sur m machines dans le même ordre. Une machine peut exécuter une seule opération à la fois, chaque job ne peut avoir qu'une seule opération en cours de réalisation simultanément et la préemption n'est pas autorisée. Notre but est toujours de minimiser le temps total d'exécution aussi appelé makespan.

Mots clés

Modélisation, ordonnancement, Flow-Shop, ENIEM, PERT, GANTT, MPM, Johnson, NEH, Heuristique, LINGO, makespan, Bellman.