

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا

Ecole nationale supérieure de technologie

Département : Génie logistique et transport

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'état en

Ingénierie de la chaîne logistique

- Thème -

Résolution d'un problème d'ordonnancement des tâches
dans une unité de production

Cas BIOPHARM

Réalisé par :

ZINAI Lamia

Les membres de Jury :

ZIDANI Omar	MAA	Président
ANNAD Oussama	MCB	Promoteur
BEN AISSA Mohammed Lazhar	MCB	Examineur
TOUMI Manel	MAB	Examinatrice

Alger, le 26/06/2023

“

Dédicace

Dédicasse Du fond de mon cœur, je souhaite dédier ce travail à tous ceux qui me sont chers,

À ma chère mère, L. Fatima, je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour son soutien indéfectible, son amour inconditionnel et ses précieux conseils tout au long de mes études. Que ce modeste travail soit l'accomplissement de vos souhaits les plus chers, le fruit des innombrables sacrifices que vous avez consentis pour moi.

À mon cher père, Ahmed, je suis reconnaissante pour ta présence bienveillante, ton soutien constant et tes encouragements tout au long de mon parcours académique. Ton dévouement et ta confiance en moi ont été des sources d'inspiration inestimables.

À mes chères sœurs, Soumia, Hadjer, et Mouna, que ce travail soit un témoignage de notre lien familial et de notre soutien mutuel tout au long de notre parcours académique.

À mes chers amis, M. Yasmine, C. Lamia, K. Madina, B. Ryad, et mes autres amis, votre amitié précieuse a illuminé mes journées et m'a apporté un soutien indéfectible. Votre présence m'a rappelé la beauté de l'amitié et m'a donné la force de persévérer.

Que ces mots témoignent de toute l'affection que je vous porte et de la gratitude infinie que j'éprouve envers chacun de vous. Vous avez fait une différence dans ma vie et je suis honorée de vous avoir à mes côtés.

Lamia ”

“

Remerciement

Je tiens à adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont assisté, aidé et contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

En particulier, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je suis profondément reconnaissant envers Mr ANNAD Oussama, mon promoteur dévoué. Je lui suis reconnaissante de sa présence inspirante et de son accompagnement bienveillant tout au long de mon projet. Son expertise et ses conseils précieux ont été essentiels à ma réussite.

À mes professeurs, je suis extrêmement reconnaissante de leur engagement envers ma formation. Leur passion pour l'enseignement et leur volonté de partager leurs connaissances m'ont grandement inspiré. Leurs conseils avisés, leurs encouragements et leurs commentaires constructifs m'ont permis de progresser et de repousser mes limites.

Je tiens également à remercier chaleureusement l'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative qui a contribué à ma formation.

Ce PFE a été une expérience enrichissante et je suis consciente que cela n'aurait pas été possible sans votre précieuse aide. Votre passion, votre expertise et votre dévouement ont été des sources d'inspiration pour moi.

Que nos réussites communes continuent d'inspirer de futurs étudiants et que vous soyez récompensés pour vos efforts inlassables.

Avec une gratitude infinie,

ZINAI Lamia

”

Table des matières

Introduction générale	1
1 État des lieux	3
1.1 Introduction	4
1.2 Présentation du secteur d'activité	4
1.2.1 Présentation de l'industrie pharmaceutique internationale	4
1.2.2 Présentation de l'industrie pharmaceutique en Algérie	5
1.3 Présentation de BIOPHARM	6
1.3.1 Groupe BIOPHARM	6
1.3.2 Présentation de BIOPHARM industrie	8
1.4 Le périmètre du projet	8
1.4.1 Procédure de gestion de la supply chain	9
1.4.2 Gestion des réceptions des intrants	10
1.5 Analyse des problèmes rencontrés	11
1.6 Enoncé de la problématique	12
1.7 Conclusion	13
2 État de l'art	14
2.1 Introduction	15
2.2 La gestion de production	15
2.3 Décisions stratégiques	15
2.4 Décisions tactiques	15
2.4.1 Méthodes de planification	16
2.5 Décisions opérationnelles	16
2.6 L'ordonnancement	17
2.6.1 Notations de base en ordonnancement	17
2.7 Schéma de classification des problèmes d'ordonnancement	20
2.8 Les modèles des problèmes d'ordonnancement	22
2.8.1 Problème à une opération	22
2.8.2 Problèmes à plusieurs opérations	23
2.9 Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement	24
2.9.1 Les méthodes exactes	25
2.9.2 Les méthodes approchées	25
2.9.3 Complexité algorithmique	27
2.9.4 Complexité problématique	27
2.10 Conclusion	28
3 Étude et méthode de résolution des problèmes à résoudre.	29

3.1	Introduction	30
3.2	Description du système	30
3.3	Définition du problème	31
3.4	Modélisation analytique	33
3.4.1	Les paramètres	33
3.4.2	Les coefficients	33
3.4.3	La fonction objective	34
3.4.4	Les contraintes	34
3.5	Démarche de résolution	34
3.5.1	Fonctionnement de la règle du TOM pondéré	35
3.5.2	Pseudocode	35
3.6	Critique de la démarche	36
3.6.1	Les inconvénients	36
3.6.2	Les avantages	36
3.6.3	Amélioration de la solution	37
3.7	Conclusion	38
4	Implémentation et résultats	39
4.1	Introduction	40
4.2	Les outils utilisés	40
4.2.1	Outils de stockage de données	40
4.2.2	langages de programmation	40
4.2.3	Environnement de développement	41
4.3	Les bibliothèques	41
4.4	L'implémentation	42
4.5	Résultats	42
4.6	Comparaison des résultats	43
4.7	Conclusion	44
	Conclusion	45
	Bibliographie	47
	Annexes	49
A		50
52		ملخص
53	Résumé	
54	Abstract	

Table des figures

1.1	Le marché pharmaceutique mondial par zone géographique en 2021	4
1.2	Les principaux acteurs mondiaux du marché pharmaceutique : Une analyse Des facteurs de croissance	5
1.3	Structure de BIOFARM	7
1.4	Structure interne de BIOPHARM industrie	8
2.1	Organisation hiérarchique d'un système de production (thèse de doctorat, 2017) 16	
2.2	Les types d'ateliers	21
2.3	Modèle à machine uniques	23
2.4	Modèles à machines parallèles	23
2.5	Atelier de Flow-shop	24
2.6	Atelier Job-shop	24
2.7	Méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement	27
3.1	Atelier Job-shop	30
3.2	Structure générale de l'algorithme 1	36
3.3	Structure générale de l'algorithme 2	38
4.1	Données d'entrée du plan d'ordonnancement	41
4.2	Diagramme de GANTT	42
4.3	Quelques lignes du Plan d'ordonnancement du mois de mars	43
4.4	Plan d'ordonnancement actuel	44

Liste des tableaux

1.1	Classement des ventes des entreprises pharmaceutiques leaders	6
3.1	Exemple d'ordonnancement en suivant la règle de TOM pondéré	35
4.1	Comparaison entre la méthode classique et la solution informatique	44

Introduction générale

La gestion efficace de la production est un enjeu majeur pour les entreprises industrielles. Dans ce mémoire, nous abordons le problème spécifique de l'ordonnancement au sein de l'unité de production de l'entreprise BIOPHARM. Avant de plonger dans notre étude approfondie, il est essentiel de dresser un état des lieux pour comprendre le contexte dans lequel se déroule notre recherche.

Le premier chapitre de ce mémoire s'attache à fournir un aperçu de l'industrie pharmaceutique à l'échelle internationale et en Algérie, en mettant particulièrement l'accent sur la position de BIOPHARM dans ce secteur. Nous présenterons également la création de l'entreprise, son évolution, son organisation et le département concerné par notre étude. Dans un deuxième temps, nous examinerons en détail le processus de gestion de la Supply Chain, ce qui nous permettra d'analyser les problèmes qui entravent son bon fonctionnement.

Cette analyse approfondie du contexte nous conduira à formuler la problématique que nous aborderons dans les chapitres suivants. L'ordonnancement des tâches représente un aspect clé de l'optimisation des systèmes de production. Ce sujet suscite un vif intérêt dans la littérature de recherche opérationnelle. Il consiste à prendre des décisions stratégiques concernant l'allocation des ressources et la planification de l'exécution des tâches, en fixant leurs dates de début et de fin. La résolution de ce type de problème fait appel à différentes méthodes, allant des approches approximatives aux méthodes exactes, qui visent toutes à répondre aux questions fondamentales : Quand ? Et avec quels moyens ?

Le prochain chapitre de ce mémoire vise à présenter les concepts fondamentaux de l'ordonnancement, ainsi que les méthodes et outils théoriques utilisés dans notre approche pour résoudre la problématique posée. Nous commencerons par définir la gestion de la production, puis nous aborderons la planification avant d'étudier les problèmes d'ordonnancement dans le contexte de la production. Nous examinerons également les différentes méthodes de résolution, les typologies et les classifications présentes dans la littérature spécialisée.

Une fois les bases théoriques et mathématiques établies, nous nous concentrerons sur l'étude approfondie du système de production de BIOPHARM dans un chapitre dédié. Nous décrirons en détail le système en mettant en évidence les principaux facteurs et éléments à prendre en compte. Ensuite, nous modéliserons le problème analytiquement et le classerons en fonction des références de l'état de l'art. Nous choisirons ensuite la méthode de résolution la plus adaptée pour obtenir une solution optimale au problème d'ordonnancement, en tenant compte

des contraintes spécifiques du système. Nous évaluerons cette méthode selon des critères tels que la complexité, la flexibilité et l'adaptabilité aux contraintes particulières du système. Nous mettrons également en évidence les avantages et les inconvénients de la solution proposée, afin de proposer des améliorations visant à optimiser davantage l'ordonnancement.

Enfin, après avoir établi les fondements théoriques et mathématiques, nous passerons à l'implémentation pratique dans le chapitre suivant. Nous détaillerons les outils utilisés et présenterons les résultats obtenus, en les comparant avec les résultats réels de l'entreprise BIOPHARM. Cette étape nous permettra de conclure notre étude en soulignant les principales contributions de notre travail et en proposant des pistes d'amélioration pour l'ordonnancement au sein de l'unité de production de BIOPHARM.

Ce mémoire vise ainsi à fournir une analyse approfondie et une proposition concrète pour résoudre le problème d'ordonnancement au sein de l'unité de production de BIOPHARM.

Chapitre 1

État des lieux

1.1 Introduction

Avant toute étude, il est nécessaire de mettre en place l'état des lieux afin de situer le cadre dans lequel l'étude se déroule. Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu donner un aperçu sur l'industrie pharmaceutique internationale et en Algérie, pour arriver à la position de BIOPHARM dans cette dernière. Ensuite, nous allons présenter la création de BIOPHARM, son évolution, son organisation et enfin le département d'accueil. Dans un deuxième lieu, nous allons expliquer le processus de gestion de la Supply Chain qui va nous permettre de réaliser une analyse des problèmes qui menacent le bon déroulement de cette dernière pour bien cerner le contexte du projet, nous concluons ce chapitre par la formulation de la problématique qui sera traitée dans les prochains chapitres.

1.2 Présentation du secteur d'activité

1.2.1 Présentation de l'industrie pharmaceutique internationale

L'industrie pharmaceutique internationale est un secteur économique et stratégique qui englobe les entreprises spécialisées dans la recherche, production et la commercialisation de médicaments pour la médecine humaine ou vétérinaire et d'autres produits pharmaceutiques. L'augmentation des revenus de la classe moyenne des marchés émergents a aidé à l'amélioration des systèmes de santé et par conséquent la demande de médicament a augmenté ce qui justifie la hausse du chiffre d'affaires du marché mondial des médicaments en 2021 de 6,8% par rapport à 2020 et qui a atteint 1291 milliards de dollars dont 47,2 des ventes reviennent au marché nord-américain (l'organisation professionnelle des entreprises de médicaments, 2023).

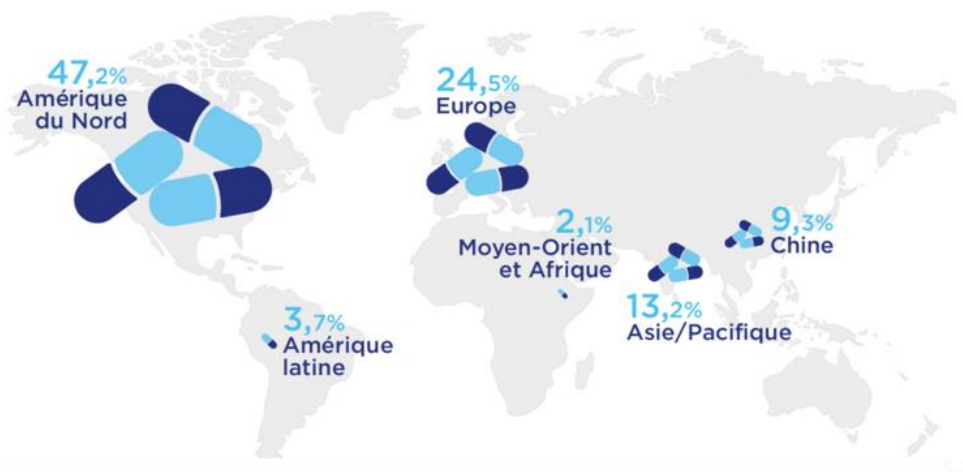


FIG. 1.1 : Le marché pharmaceutique mondial par zone géographique en 2021(IQVIA)

Plusieurs facteurs ont aidé à cette évolution, on en cite l'apparition de nouvelles maladies (la fabrication des vaccins contre le Covid-19), le vieillissement de la population et

donc le besoin de la recherche et développement de nouveaux médicaments et enfin l’explosion démographique. Le marché pharmaceutique mondial est très globalisé, le nombre d’entreprises qui se partage le grand part du marché est minime ces entreprises sont appelées ” Global players ” et sont présentées dans la figure 1.2

		Chiffre d'affaires PFHT (en Md\$)	Part de marché
1	ABBVIE (Etats-Unis)	66,5	5,2%
2	JOHNSON & JOHNSON (Etats-Unis)	66,5	5,1%
3	NOVARTIS (Suisse)	57,0	4,4%
4	BRISTOL MYERS SQUIBB (Etats-Unis)	48,0	3,7%
5	ROCHE (Suisse)	47,4	3,7%
6	SANOFI (France)	46,6	3,6%
7	MERCK & CO (Etats-Unis)	44,3	3,4%
8	GLAXOSMITHKLINE (Royaume-Uni)	42,9	3,3%
9	NOVO NORDISK (Danemark)	41,3	3,2%
10	LILLY (Etats-Unis)	40,8	3,2%

Les chiffres présentés ci-dessus s'appuient sur des données d'achats hospitaliers et officinaux. Ils n'incluent donc pas les achats d'Etat ou des centres de vaccination (vaccins contre la Covid-19).

FIG. 1.2 : Les principaux acteurs mondiaux du marché pharmaceutique : Une analyse des facteurs de croissance (IQVIA)

1.2.2 Présentation de l’industrie pharmaceutique en Algérie

L’industrie pharmaceutique en Algérie est l’un des rares secteurs à avoir gagné des parts de marché face à l’importation, la production nationale de médicaments a dépassé le montant de 2,5 milliards d’euros, en 2021, selon les données de ministre, grâce à l’entrée en service de près de 60 nouvelles lignes de production.

Le marché pharmaceutique algérien est le plus important du grand Maghreb et le troisième du continent africain après l’Égypte et l’Afrique du sud. La production nationale a observé un bon considérable entre 2015 et 2021 tel que l’on considère que nous sommes passés d’une production qui couvre 30% des besoins du marché en 2015 (l’Office National des Statistiques algérien, 2015) vers 3/4 des produits médicamenteux produits localement (Algérie Presse Service, 29 Décembre 2021).

Les laboratoires pharmaceutiques algériens ont réalisé une performance énorme durant ces dernières années, cela est dû à la volonté des autorités de renforcer la production locale. De nombreuses entreprises privées ont pu voir le jour grâce à l’initiation de l’état à l’investissement dans l’industrie pharmaceutique privée, parmi celles-ci BIOPHARM qui fait partie des cinq top players selon les ventes du premier quart de l’année 2022 présentés dans le tableau 1.1

Classement	Entreprise	Ventes (Mn \$)
1	Sanofi	295.6
2	Novo Nordisk	197
3	El kendi	166.1
4	Hikma Pharma	140.8
5	Biopharm	83.4

TAB. 1.1 : Classement des ventes des entreprises pharmaceutiques leaders (Algérie-part)

1.3 Présentation de BIOPHARM

1.3.1 Groupe BIOPHARM

En 1991, Dr. Abdelmadjid KERRAR a créé un laboratoire pharmaceutique BIO- PHARM qui se définit comme étant un groupe commercial et industriel et qui a investi depuis sa création dans le secteur pharmaceutique, ce groupe dispose aujourd’hui d’une unité de production aux normes internationales et d’un réseau de distribution aux grossistes et aux pharmacies.

Après plus de deux décennies de son activité, BIOPHARM a acquis une solide réputation dans le secteur pharmaceutique ce qui lui a permis, aujourd’hui, grâce à son réseau commercial dense constitué de 14 centres de distribution, de plus de 150 grossistes et 3000 officines pharmaceutiques, et d’être en mesure de distribuer plus de 4000 produits pharmaceutiques sur tout le territoire Algérien. Ce réseau tourné vers la satisfaction des clients, est certifié depuis 2008 selon le Référentiel Qualité ISO 9001.

BIOPHARM a été la première entreprise à obtenir la certification des bonnes pratiques de fabrication de l’agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé, elle fabrique 130 produits de différentes formes dont 104 sont des produits de marque BIOPHARM.

Ce réseau commercial a établi des liens durables avec plus de 50 laboratoires internationaux parmi les plus réputés : Abbott, Astra Zeneca, Bayer, Cipla, Pierre Fabre. BIOPHARM a également réalisé un investissement industriel ambitieux constitué d’une unité de fabrication de médicaments conçue suivant les meilleurs standards internationaux. Bâtie à Oued Smar sur un site de 8 000 m², cette unité est en mesure de mettre sur le marché jusqu’à 50 millions d’unités annuellement.

Le laboratoire propose aux professionnels de la santé et leurs patients une gamme de médicaments assez riche et qui couvre dix classes thérapeutiques mentionnées ci-dessous :

- **Anti-inflammatoires et antalgiques.**
- **Anti-infectieux.**
- **Cardiologie.**
- **Dermatologie.**
- **Diabétologie.**
- **Gastro-entérologie.**

- **Gynécologie.**

- **Neuro-psychiatrie.**

- **Pneumo-allergologie.**

1.3.1.10 OTC.

Dans le but d'étendre son marché à l'international, BIOPHARM s'est organisée par une structure qui regroupe ses différents métiers, cette dernière est présentée dans la figure 3.

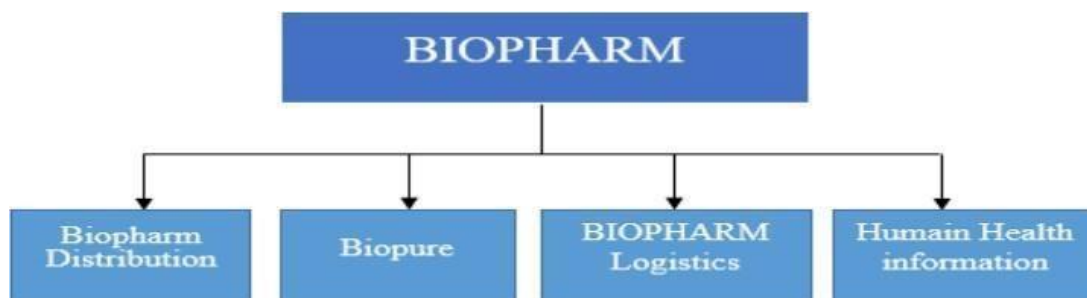


FIG. 1.3 : Structure de BIOFARM

- 1.3.1.1 **Biopharm** : Le noyau central du groupe qui s'occupe de la production des médicaments et qui est bâti sur un site de 8000 m² avec une capacité de production de 35 millions d'unités par an.
- 1.3.1.2 **Biopharm distribution** : Cette filiale assure la distribution des médicaments en gros grâce à son large réseau de distribution qui couvre tout le territoire national et qui approvisionne plus de 150 grossistes en produits pharmaceutiques.
- 1.3.1.3 **BIOPURE** : Une filiale de BIOPHARM industrie qui s'occupe de la répartition d'un éventail de 4000 références médicamenteuses sur un réseau de plus de 3000 officines réparties sur tout le territoire national.
- 1.3.1.4 **BIOPHARM Logistics** : Cette filiale assure les prestations logistiques de l'industrie pharmaceutique avec un objectif de maintenir des standards internationaux de service.
- 1.3.1.5 **Human Health Information (HHI)** : Une société médicale qui est spécialisée dans l'information médicale, le conseil promotionnel et le recrutement et la formation des délégués médico-commerciaux.

1.3.2 Présentation de BIOPHARM industrie

Le groupe BIOPHARM a adapté sa structure organisationnelle à ses différents métiers, BIOPHARM industrie étant la société mère du groupe est chargée de la production de médicaments et a deux directions principales.

a. Direction principale Cette direction englobe les départements opérationnels qui s'occupent de la production et le contrôle qualité de produits et ressources en plus de la garantie du bon déroulement des activités de la supply chain.

b. Direction administrative et financière (DAF)

Elle contient la majorité des processus support de l'entreprise, la DAF est chargée des affaires administratives, de la comptabilité et de la gestion des ressources humaines. La structure interne de l'entreprise est présentée dans la figure 1.4

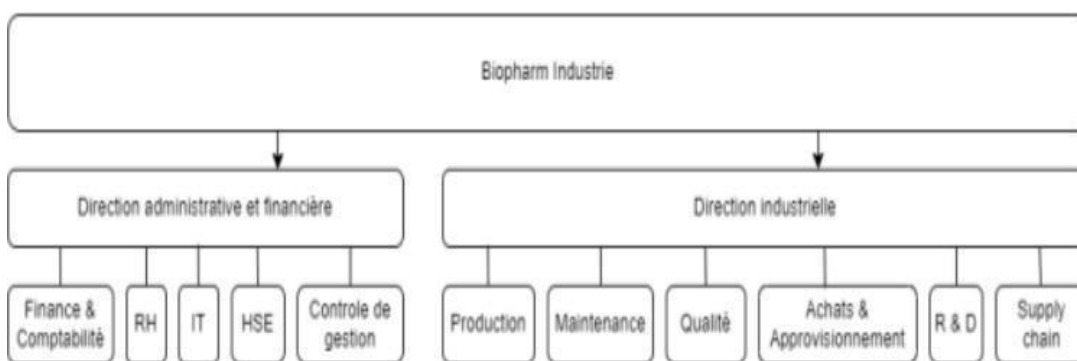


FIG. 1.4 : Structure interne de BIOPHARM industrie

1.4 Le périmètre du projet

Le stage proposé par l'entreprise concerne le département de la supply chain qui s'occupe de la planification, l'exécution et le contrôle de toutes les activités liées aux flux de matières et d'information lors de l'achat, de la transformation et de la livraison finale. Ce département est subdivisé en trois services

a. Ordonnancement

Qui se charge de la planification de la production en fonction des commandes et les prévisions de ventes, ce qui veut dire la détermination des quantités à produire, les ressources à utiliser, les délais de production ainsi que les dates de livraison, il est responsable également du suivi du plan d'ordonnancement selon les modifications et les retards. Et enfin le lancement des ordres de fabrication.

b. Planification

Qui gère les relations avec les fournisseurs et la disponibilité des matières nécessaires à la production par le calcul des besoins, création des demandes d'achat et suivi du plan d'approvisionnement ainsi que la facturation des PF libérés et le suivi du plan de livraison

pour assurer le respect des délais.

c. **Logistique**

Qui se charge de la gestion de stock et du transport des intrants de production et des produits finis. Biopharm dispose de

- Magasin central : au niveau de Bouira, où tous les intrants de production (MP/ADC/Granulé et vrac) sont réceptionnés en externe (des différents fournisseurs) ou en interne (retour des intrants de production).
- Magasin tampon OSM : au niveau d'Oued Smar, réservé au stockage des intrants de production des OF émis pour une durée déterminée.
- Magasin tampon PROFAM GAZELLE : au niveau d'Ouled Hedadj, réservé au stockage des intrants de production des OF émis pour une durée déterminée.
- Magasin tampon PROFAM SPONC : au niveau de Reghaia, réservé au stockage des intrants de production des OF émis pour une durée déterminée.

1.4.1 Procédure de gestion de la supply chain

a. **Etablissement du programme prévisionnel de vente**

Le département Health and Human information établit un programme prévisionnel des ventes de produits finis pour l'année N+1 avant le 15 août de l'année N afin de permettre aux sites de production (BIND/PROFAM) de fixer les programmes prévisionnels de production et de livraison (budget annuel), le programme d'approvisionnement, d'acquiescer les différentes autorisations d'importation et de renouveler les demandes d'accord préalables pour les produits dangereux et psychotropes.

b. **Calcul du besoin annuel**

Dès la confirmation du programme annuel des ventes, le service de planification se charge du calcul du besoin annuel et l'évaluation des disponibilités en intrants qui seront mis à jour mensuellement. Le besoin annuel dépend de la nature du produit

- **Produit de nature Make to Stock** : le besoin se calcule en se basant sur les prévisions de vente de HHI sur un horizon de 6 mois tout en constituant un stock de sécurité de 3 mois.
- **Produit de nature Make To Order** : le besoin se calcule en se basant sur les commandes fermes de HHI sans constitution d'un stock de sécurité.

c. **Gestion des demandes d'achat**

Après avoir calculé le besoin net, une demande d'achat sera lancée en majorant les besoins de 5% pour les matières premières et 10 % pour les articles de conditionnement. Les demandes d'achat sont lancées par le service de planification sur le progiciel SAGE X3 puis transmises au service d'approvisionnement pour traitement et création des commandes

d'achat dans un délai qui ne dépasse pas les 15 jours après réception de la DA.

1.4.2 Gestion des réceptions des intrants

Une fois la marchandise est réceptionnée au magasin central, il faut procéder à la vérification de conformité de la marchandise, des documents, de l'état de camion ainsi que l'état de la marchandise, puis à saisir la réception sur SAGE X3 et transmettre le bon d'entrée au service d'approvisionnement.

Ensuite, la marchandise est dépoussiérée avant de la faire entrer dans la zone de stockage où les palettes sont pesées et étiqueter. La marchandise à prélever sera transférée vers les salles de prélèvement avec une demande d'échantillonnage transmise au laboratoire de contrôle et de qualité.

Finalement, les intrants sont prélevés et contrôlés pour basculer du statut quarantaine Q vers le statut attribué et ensuite les stocker dans la zone dédiée.

1.4.3 Gestion du plan de production

a. Programme d'ordonnement : Le service d'ordonnement établit un programme d'ordonnement sur la base du plan directeur de production et qui s'étale sur un horizon de 4 semaines. Le but de ce programme est de déterminer un volume optimal en maximisant le temps dédié exclusivement à la production tout en prenant en considération diverses contraintes telles que :

- La priorité des livraisons sur la base du stock disponible.
- La cadence des machines.
- L'organisation des équipes.
- La disponibilité en stock de matières premières (MP) et d'articles de conditionnement (ADC).

2 Gestion des ordres de fabrication : Les ordres de fabrication sont lancés sur la base du programme d'ordonnement du mois en cours et sont gérés sur le système SAGE X3. Il existe trois types d'ordres de fabrication :

2.1.1.1 Ordre de fabrication des produits de routine : ils concernent les lancements des produits routiniers commercialisés. Si le produit fini est de forme sèche, il passe par deux étapes :

2.1.1.1.1 Partie fabrication : l'ordre de fabrication contient l'ensemble des matières premières nécessaires à la fabrication du vrac (PA/granulé + excipients).

2.1.1.1.2 Partie conditionnement : l'ordre de fabrication contient le vrac ainsi que les articles de conditionnement afin de composer le produit fini (vrac + ACP + ACS).

Si le produit fini est de forme liquide ou pâteuse, il passe par un processus dit Full process, c'est-à-dire que toutes les étapes de fabrication (conditionnement primaire et conditionnement secondaire inclus) sont réalisées d'une manière continue et complète.

2.1.1.2 **Ordre de validation / revalidation** : ils concernent les lancements du service NP (Nouveau Produit), ou bien d'une revalidation par rapport au changement de source de matière première (PA), au changement de taille de lots, etc.

2.1.1.3 **Ordres de retraitement** : ils sont dédiés aux produits finis nécessitant une opération de retraitement suite à une anomalie détectée sur une partie ou la totalité du lot.

1.4.4 Gestion du plan de livraison

Durant la réunion Sales and Operations planning (SOP) un plan de livraison est validé, le suivi de ce plan se fait sous forme d'un état de suivi de commandes de PF actualisé au fur et à mesure de la livraison.

1.5 Analyse des problèmes rencontrés

Lors de notre visite au département de la supply chain, nous avons pu constater certains problèmes que nous allons énumérer ci-dessous.

a. Service d'ordonnancement

- Annulation ou modification de commandes inattendues, ce qui peut entraîner des perturbations dans le plan d'ordonnancement et donc des coûts supplémentaires.
- Absence de coordination avec les autres services du département qui sont impliqués dans le processus de production de manière directe ou indirecte, et un retard de transfert de données entre eux.
- L'ordonnancement des tâches se fait sur la base de l'expérience du planificateur, par conséquent, le plan peut ne pas être à son état optimal en raison de la mauvaise évaluation des délais ou de l'exploitation des ressources.
- Manque de clarté sur les données relatives à l'état des stocks et à la disponibilité des ressources.
- La difficulté d'interpréter le plan d'ordonnancement qui est présenté sous forme d'un tableau Excel.

b. Service de planification

- Retard dans la préparation des commandes de matières premières par le magasin.
- Problème de conformité réglementaire en raison de la sensibilité des produits.
- Manque de coordination avec les magasins.

c. Service logistique

- Gestion inefficace des stocks, ce qui entraîne des surstocks ou des ruptures de stocks.
- Retard dans la livraison des matières premières.
- Difficulté à maintenir un flux régulier des matières premières nécessaires à la production.
- L'obligation de transporter les médicaments dans des conditions de sécurité précises.
- Le statut des produits stockés peut changer (en quarantaine, accepté, rejeté, etc.) après avoir procédé à des expériences chimiques, il est donc primordial de suivre ces changements et de mettre à jour les données.

Suite à cette analyse, nous avons pu identifier quelques problèmes liés à la procédure suivie par le département de la supply chain, qui peuvent avoir un impact nocif sur l'efficacité de la production de l'entreprise et la satisfaction des clients. On peut résumer ces contraintes en trois points : une planification non optimale, une mauvaise gestion des stocks et un manque de coordination entre les services.

1.6 Problématique de l'ordonnancement

Vu la concurrence féroce que connaît l'industrie pharmaceutique en Algérie, les entreprises de production veillent à produire d'une manière plus efficace et plus rentable que leurs concurrents afin de maintenir leurs positions sur le marché, tout en prenant en compte les exigences des clients qui se traduisent par une bonne qualité, des coûts réduits et des délais courts.

L'efficacité et la rentabilité d'une entreprise dépendent fortement d'une bonne gestion de production, ce qui implique une planification minutieuse des différentes étapes du processus de production. À cet égard, l'ordonnancement est une étape clé d'une gestion de production fiable, en particulier dans l'industrie manufacturière où la probabilité de rencontrer des changements et des imprévus est élevée.

De plus, les entreprises algériennes continuent de faire face à des défis dans la numérisation des données et l'automatisation de certains processus. L'intégration de bonnes pratiques dans la culture de l'entreprise représente un véritable obstacle à surmonter.

Après avoir analysé en détail le processus adopté par le département de la supply chain et après concertation avec la chargée de planification, nous avons défini les objectifs de ce projet, que nous pouvons résumer comme suit :

- Progresser dans l'automatisation des systèmes de gestion.
- Réduire les délais de réalisation des plans d'ordonnancement.
- Augmenter le taux de service en améliorant la productivité et l'efficacité.
- Mettre en place une structure de planification concrète.

Afin d'atteindre ces objectifs et d'apporter des solutions pertinentes, il est essentiel de mettre en lumière l'objet qui fera notre étude qui **l'ordonnement**.

1.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour la présentation de l'entreprise BIOPHARM et ses activités ainsi que le périmètre de projet, ensuite, nous avons cernés les problèmes rencontrés dans les différents services et qui nous ont permis de mettre en lumière la problématique à étudier. Les objectifs étant cernés, le chapitre qui suit portera sur les concepts théoriques qui seront d'une grande aide au cours de notre travail.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Introduction

L'optimisation des systèmes de production représente un enjeu important pour les industriels, c'est pour cela nous trouvons que le problème d'ordonnancement est parmi les branches de la recherche opérationnelle les plus abordées en littérature, et qui se définit comme étant le processus de décision qui aide à la programmation de l'exécution de l'ensemble des tâches, en leur allouant les ressources requises tout en fixant leurs dates de début et de fin.

La résolution de ce type de problème peut se faire à l'aide de différentes méthodes, en allant des méthodes approchées aux méthodes exactes, qui répondent tous aux mêmes questions Quand ? Et avec quels moyens ?

Cette partie permet de comprendre les concepts fondamentaux du problème de l'ordonnancement ainsi que les méthodes et outils du cadre théorique qui sont utilisés dans la démarche adoptée pour la résolution de la problématique. Nous allons présenter en premier lieu la définition de la gestion de production pour arriver ensuite à la planification qui va nous mener à l'étude des problèmes de l'ordonnancement dans la production, ces méthodes de résolution, ces typologies et ses classifications dans la littérature.

2.2 La gestion de production

La gestion de production est l'ensemble des décisions, méthodes et stratégies impliquées dans la planification de la production qui visent à limiter les ressources et processus nécessaires pour satisfaire les besoins des clients et garantir une production efficace et efficiente tout en mettant en place des outils d'analyse qui visent à l'amélioration de la performance de la production. Généralement ces décisions sont répertoriées en trois niveaux selon l'horizon du temps [1]

2.3 Décisions stratégiques

Englobe les installations de production (emplacement de nouvelles usines, produire de nouvelles références...), les prévisions en matière d'effectifs (embauche, licenciement...) et les informations relatifs aux produits, ces décisions sont caractérisées par l'horizon du temps important qu'ils couvrent [2].

2.4 Décisions tactiques

À ce niveau-là, les décisions correspondent à un ensemble de décisions à moyen terme où nous trouvons le plan de production élaboré lors de la planification et qui contient les quantités à produire par période calculées en se basant sur les demandes de cette dernière

et les contraintes déduites des décisions stratégiques [3].

2.4.1 Méthodes de planification

Dans les années 1960-1970, un ingénieur Américain Joseph Orlicky a conçu une méthode de calcul des besoins MRP (Material Requirement Planning) qui consiste à calculer le besoin brut des matériaux nécessaires pour la production mais qui ne tient pas compte des contraintes liées à la cadence des ressource. À cet effet, et en 1970 le MRP II (Manufacturing Resource Planning) est apparu, on peut le définir comme étant une extension du MRP à l'exception que MRP II intègre d'autres fonctionnalités telles que la charges des ressources[3].

Avec l'évolution de la recherche opérationnelle et les modèles mathématiques, les méthodes MRP ont vite été remplacées par un système plus complet et qui connecte tous les aspects de l'entreprise, ce système a été nommé ERP (Entreprise Resource Planning).

2.5 Décisions opérationnelles

Ces décisions concernent le fonctionnement quotidien de la production, donc, elles sont prises sur un horizon de temps très limité, on peut les définir comme étant l'organisation des ressources humaines et matérielles pour produire les quantités fixées précédemment au moindre coût (l'ordonnancement, plan de transport, gestion des ressources humaines...) [2]

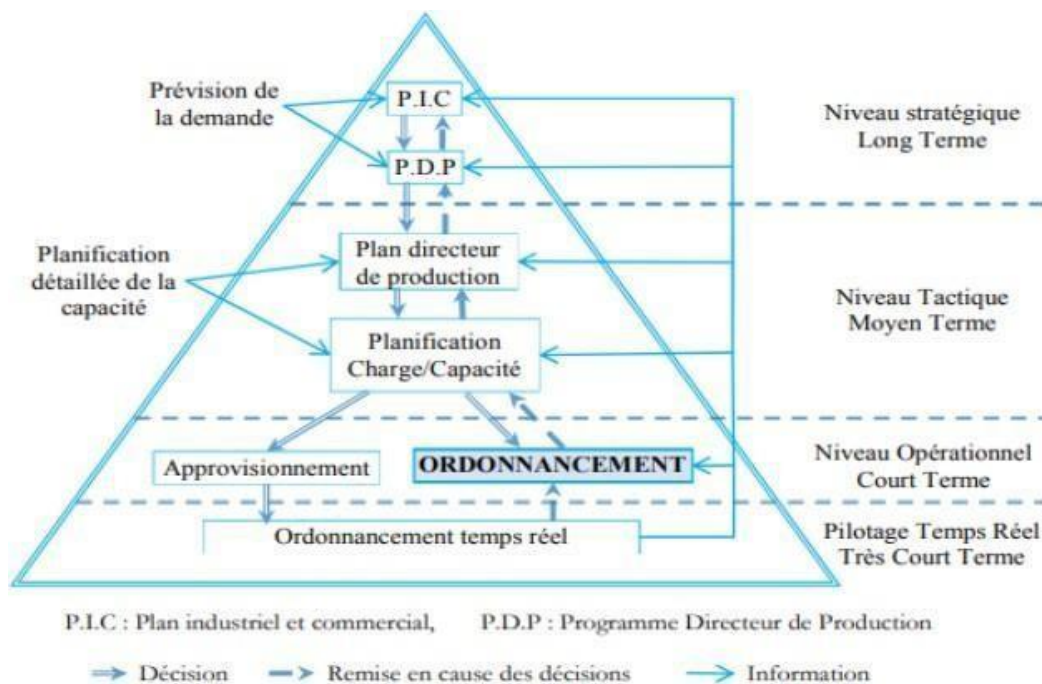


FIG. 2.1 : Organisation hiérarchique d'un système de production [18]

Il est à noter que les décisions prises à un niveau deviennent des contraintes à satisfaire pour le niveau inférieur, c'est pour cela, il est primordial de garantir la cohésion entre les décisions et les contraintes de chaque niveau.

L'une des décisions de ce niveau qui fait l'objet de notre projet qui est « L'ordonnancement » sera traité en détail dans les titres qui suivent.

2.6 L'ordonnancement

Après avoir établi le plan de production prévisionnel qui est fourni par la gestion de production à moyen terme, il est nécessaire de concevoir un plan dont lequel on répond aux questions suivantes : Que produire et quand ? Et en utilisant quelle ressource ? , il s'agit bien de l'ordonnancement que la littérature pertinente décrit précisément les contours du sujet et fournit de nombreuses définitions dont on en cite :

1. **Définition 1:** Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début. C'est un processus de prise de décision utilisé dans de nombreuses industries de production et de service. [14]
2. **Définition 2:** L'ordonnancement peut également être défini comme une allocation, dans le temps, des ressources disponibles aux différentes tâches, dans le but d'optimiser un ou plusieurs objectifs. Il occupe une place particulière et joue un rôle privilégié dans la gestion informatisée des flux de production au sein de l'entreprise, s'inscrivant dans des niveaux de décision à la fois tactique et opérationnel. [17]
3. **Définition 3:** Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, ...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises. [11]

Un plan d'ordonnancement vise généralement à atteindre les objectifs suivants :

- Optimiser l'utilisation des ressources disponibles pour la production.
- Établir l'ordre de déroulement des tâches, c'est-à-dire déterminer la date de début et de fin d'exécution de chaque tâche.
- Affecter les ressources disponibles aux tâches qui doivent être exécutées.
- Minimiser les temps d'attente et les différents coûts de production.
- Respecter les engagements concernant les livraisons.
- Minimiser les coûts de fabrication.

2.6.1 Notations de base en ordonnancement

Quand on décrit un problème d'ordonnancement, on peut dire qu'il existe quatre éléments fondamentaux qui y interviennent : les tâches à effectuer, les ressources à utiliser, les contraintes à satisfaire et les critères à optimiser.

a. Les tâches

Dans la littérature, une tâche T_i est définie comme étant une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début d'exécution notée S_i (Start time) et une date de fin F_i (Finish Time). L'achèvement d'une tâche nécessite une durée positive que l'on note P_i (Processing Time) qui représente la différence entre la date de fin et la date de début de l'exécution de la tâche [10],[15] : $P_i = F_i - S_i$.

Une tâche T_i est caractérisée par :

- La date de début de la tâche i au plus tôt R_i (release date).
- La date d'exécution de la tâche i au plus tard C_i .
- Le temps opératoire de la tâche i sur la machine j P_{ij} .
- Le facteur de priorité de la tâche i par rapport aux autres tâches W_i .

On distingue deux types de tâches :

- Tâches morcelables : également appelées préemptibles, ce sont des tâches qui peuvent être exécutées par morceaux, par une ou plusieurs ressources, ce qui facilite la résolution de certains problèmes [14].
- Tâches non-morcelables : ou tâches indivisibles, ce sont des tâches qui ne peuvent être interrompues avant leur fin et doivent être exécutées en totalité [14].

Quand une tâche est réalisée par plusieurs ressources successives, on dira que chaque ressource a réalisé une opération de la tâche. Dans notre étude, on considère chaque opération comme étant une tâche que l'on note O , et chaque lot à fabriquer comme un job que l'on note J .

b. Les ressources

Une ressource est un moyen technique, humain et financier indispensable pour la réalisation d'une tâche. Elle est disponible en quantité limitée, sa capacité est supposée constante. Les ressources peuvent avoir différents types [5] :

- **Ressource renouvelable** : Elle redevient disponible pour les autres tâches en même quantité après avoir été utilisée par une tâche ou allouée à cette dernière, par exemple : les machines, les fichiers, les hommes, etc. Les ressources renouvelables sont de deux types :
 - **Ressource disjonctive** : C'est aussi ce qu'on appelle une ressource non partageable. Comme son nom l'indique, ce type de ressource ne peut être partagé entre les tâches, c'est-à-dire qu'elle ne peut exécuter qu'une seule tâche à la fois.
 - **Ressource cumulative** : Également appelée ressource partageable, elle peut être utilisée par plusieurs tâches simultanément.
- **Ressource non renouvelable** : Une ressource est dite non renouvelable ou consommable si elle est épuisée lors de son utilisation par une tâche et ne sera plus disponible pour les autres.

- **Ressources doublement contraintes :** Elles combinent les contraintes des deux catégories mentionnées ci-dessus. Leur consommation immédiate ou globale est limitée. À titre d'exemple, on peut citer les ressources énergétiques.

c. Les contraintes

Une contrainte est une restriction qui conditionne l'admissibilité de l'ordonnement. En d'autres termes, les contraintes représentent des limitations sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables exprimant les relations entre les tâches et les ressources. Étant donné qu'elles nous renseignent sur les freins imposés par l'environnement, plus les contraintes sont nombreuses, plus le problème d'ordonnement devient difficile et plus réaliste [1].

Il est possible de répartir les contraintes en deux grandes familles, les contraintes temporelles et les contraintes de ressources [1].

- **Les contraintes temporelles :**

Ces contraintes représentent les restrictions liées à la gestion du temps, elles peuvent être [10] :

- Contraintes de temps alloué : généralement issues d'exigences de gestion portant sur les dates butoirs des tâches ou la durée totale du projet. - Contraintes de précédence : ou contraintes de cohérence technologique, ce type de contrainte lie le début d'une tâche à la fin d'une autre.

- **Les contraintes de ressources :**

Cette famille de contrainte traduit la disponibilité en quantité limitée ou non des ressources. Ces contraintes peuvent être soit de nature disjonctive, soit cumulative.

- Les contraintes disjonctives : on peut dire que cette contrainte est satisfaite entre deux tâches si et seulement si ces dernières s'exécutent dans des fenêtres de temps disjointes, avec ou sans temps d'attente.

- Les contraintes cumulatives : on parle de contraintes cumulatives lorsque le nombre de tâches à exécuter par la même ressource est limité, car elle est disponible en quantité limitée.

d. Les critères

Lorsqu'on aborde un problème d'ordonnement, il est indispensable de définir un ou plusieurs objectifs à optimiser. L'optimisation peut être monocritère lorsqu'on s'intéresse à l'optimisation d'un seul critère, et multicritère lorsqu'on s'intéresse à plusieurs critères. Dans la littérature, on trouve plusieurs types de critères, et nous nous intéressons à la classification suivante [14] :

- **Critères liés aux dates de fin de livraison :**

Parmi ceux-ci, on trouve le Makespan qui représente la fin d'achèvement de toutes les tâches du problème. Les critères liés aux dates de fin de livraison constituent la catégorie la plus étudiée en ordonnancement [14].

- **Critères liés aux volumes des encours :**

Dans cette catégorie, on cherche à minimiser le nombre de tâches en attente ou à maximiser le nombre de tâches terminées sur la dernière machine.

- **Critères liés à l'utilisation des ressources :**

Les critères liés à l'utilisation des ressources permettent de mettre en lumière les périodes creuses et pleines de l'utilisation des ressources. Par exemple, maximiser la charge d'une ressource.

2.7 Schéma de classification des problèmes d'ordonnancement

Vu la diversité et la variété des problèmes d'ordonnancement, de nombreuses notations ont été introduites dans la littérature pour spécifier les problèmes d'ordonnancement et trouver une typologie commune dépendante fondée sur plusieurs paramètres. Cela concerne le schéma proposé par Graham et al. (1979), puis repris par Blazewics et al. (1996). Ce schéma structure les données d'un problème d'ordonnancement sur la base de trois champs [?] :

a. Le champ Alpha α :

Le champ Alpha décrit l'environnement et l'organisation de l'atelier, et il est défini comme suit : $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2\}$, tel que :

$\alpha_1 \in \{1, P, Q, R, O, F, J, FH\}$ désigne le type de machine dans l'atelier et prend les valeurs suivantes :

- $\alpha_1 = 1$: problème mono-machine.
- $\alpha_1 = P$: Ensemble de machines parallèles et identiques qui ont la possibilité de réaliser la tâche.
- $\alpha_1 = Q$: ensemble de machines parallèles et uniformes.
- $\alpha_1 = R$: ensemble de machines parallèles quelconques.
- $\alpha_1 \in \{O, F, J\}$: l'atelier est symbolisé par O, F ou J qui signifie respectivement Open shop, Flow shop ou Job shop.
- $\alpha_1 = FH$: l'atelier est à cheminement unique, mais regroupe plusieurs exemplaires de chaque machine.

$\alpha_2 \in \{\emptyset, K\}$ désigne le nombre de machines dans l'atelier.

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

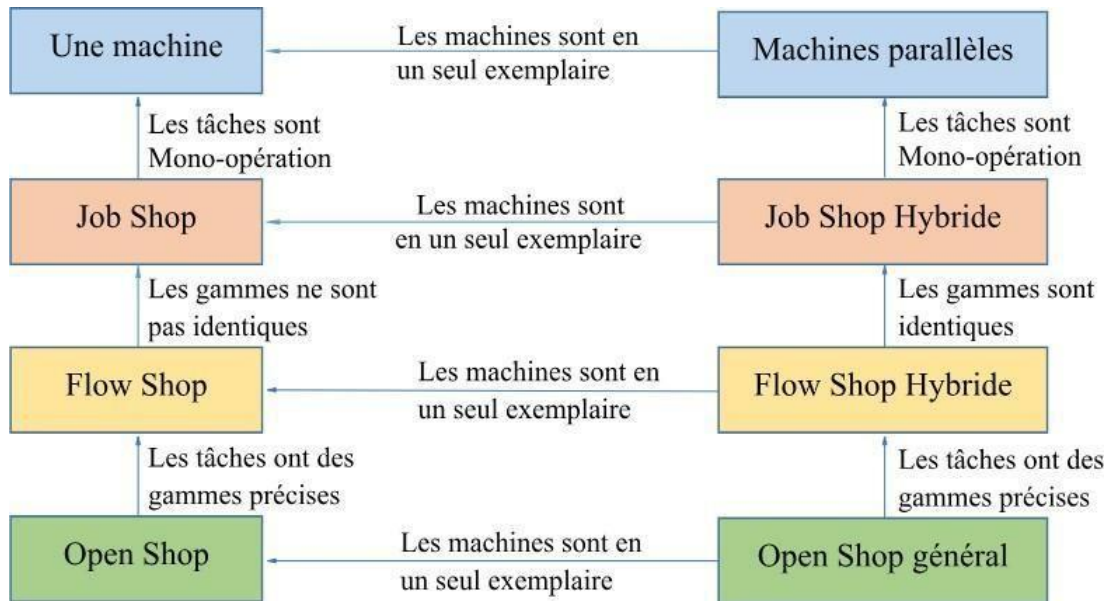


FIG. 2.2 : Les types d'ateliers

b. Le champ Beta β :

Dans ce champ, on effectue l'identification des limitations de la ligne de production et les caractéristiques des tâches. Il est composé de cinq sous-champs que l'on peut énumérer de la façon suivante :

s_i : Prémption (β_1) : indique la possibilité d'interrompre le traitement d'une opération,

- $\beta_1 = \emptyset$: la prémption de l'opération est interdite.
- $\beta_1 = \text{pmtn}$: la prémption est autorisée.

Les contraintes de précédence (β_2) : ce sous-champ précise si une relation de précédence existe entre deux tâches, on l'interprète comme suit :

- $\beta_2 = \emptyset$: les tâches sont indépendantes.
- $\beta_2 = \text{prec}$: les contraintes de précédence existent et sont quelconques.
- $\beta_2 = \text{tree}$: les contraintes de précédence sont données sous forme d'un arbre.

Les dates de disponibilité (β_3) : décrit la date à partir de laquelle une tâche peut commencer.

- $\beta_3 = \emptyset$: dates de disponibilité nulles.
- $\beta_3 = \text{ri}$: les dates de disponibilité des tâches ne sont pas forcément identiques.

Les temps de traitement (β_4) : donne des informations sur les temps de traitement en interprétant les valeurs qu'il peut prendre.

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

Les dates échues (β_5) : indique si une date limite de fin de traitement d'une tâche est imposée.

- $\beta_5 = \emptyset$ on peut l'interpréter de deux manières, soit on n'a pas de dates échues, soit on a des dates échues qui interviennent dans notre critère d'optimisation.
- $\beta_5 = di$: il existe des dates échues.

Le champ Gamma Γ :

Il s'agit de la nature des objectifs à atteindre ou des critères à optimiser. Généralement, l'objectif est une fonction temporelle. Parmi les critères d'optimalité les plus rencontrés dans le domaine d'ordonnancement, nous citons [?] :

- Date de fin ($C_{j,k}$) : correspond à la date de sortie du produit j de la machine k .
- Minimisation du maximum des retards.
- Minimisation des coûts de stockage des matières premières.
- Optimisation des changements d'outils.

2.8 Les modèles des problèmes d'ordonnancement

En se basant sur le nombre d'opérations nécessaires à l'exécution des tâches, les problèmes d'ordonnancement sont classés en deux modèles principaux : problème à une opération et problème à plusieurs opérations, que nous allons détailler dans les titres qui suivent[11].

2.8.1 Problème à une opération

Un problème à une seule opération est un modèle où la transformation de la matière première en produit fini requiert une seule étape, soit par une machine unique ou par un ensemble de machines parallèle[8].

a. Modèle à machine unique Ce modèle implique de planifier sur une seule machine l'ordonnancement des tâches qui n'exigent qu'une seule opération en optimisant un critère de performance [7]

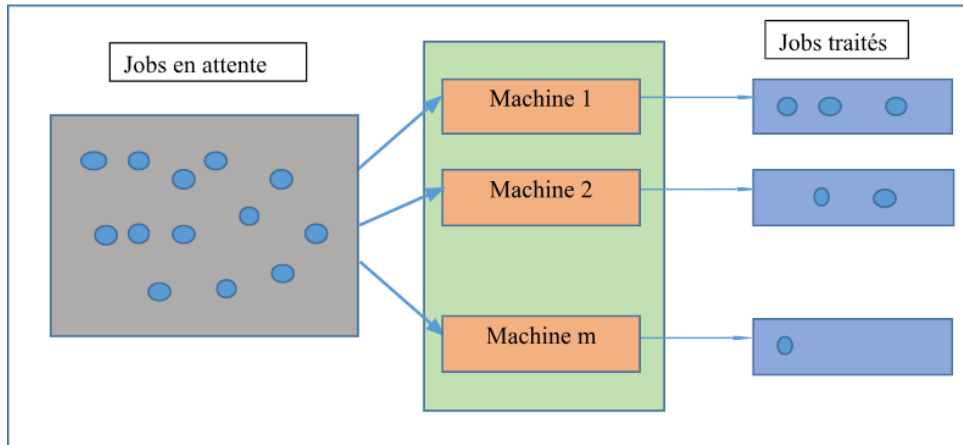


FIG. 2.3 : Modèle à machine uniques

b. Modèles à machines parallèles Un problème à une seule étape et plusieurs machines parallèles consiste à planifier l'ordonnancement d'une seule tâche qui doit être exécutée sur l'une des plusieurs machines parallèles disponibles. Chaque machine est capable de traiter la tâche. Dans ce problème, on cherche à affecter les tâches aux machines et décider l'ordre des tâches sur une même machine[7].

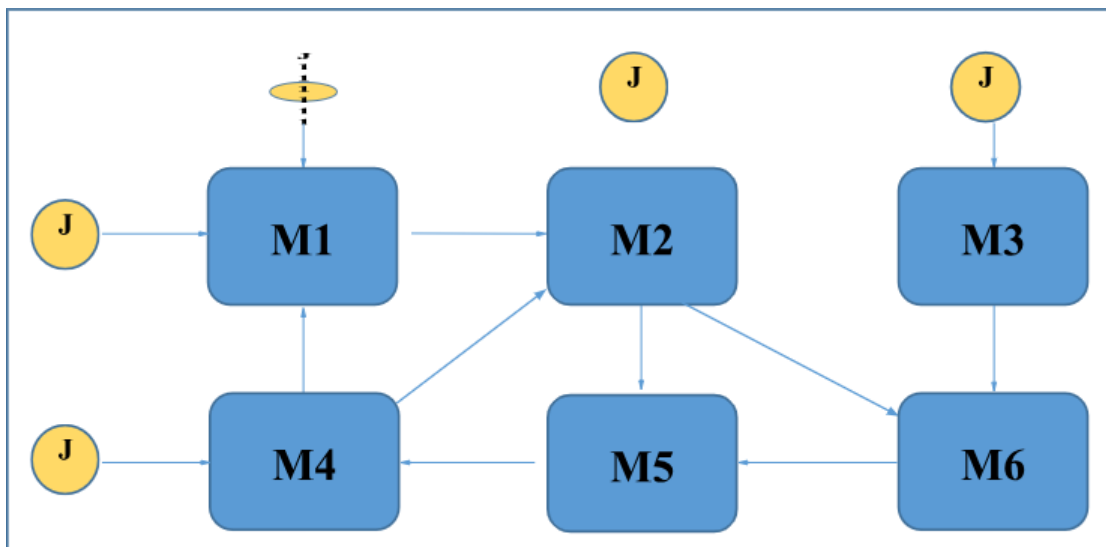


FIG. 2.4 : Modèles à machines parallèles

2.8.2 Problèmes à plusieurs opérations

Le modèle à plusieurs opérations correspond à des situations où une tâche nécessite plusieurs étapes à traverser dans un ordre précis, chacune devant être effectuée sur une machine différente ayant ses propres caractéristiques. Cela justifie le fait que ce problème est connu comme un problème d'atelier. On distingue trois types d'ateliers selon l'ordre de passage des jobs sur les machines [1] :

a. Problèmes Flow-shop Ce modèle est constitué d'un ensemble de machines disposées

en série et dont les matières visitent les machines de manière séquentielle et dans un ordre préétabli, ce qui nous permet de dire que ces machines acheminent un flux unidirectionnel. Ce problème est caractérisé par sa grande production et faible flexibilité [7].

Quand on se retrouve dans le cas où plusieurs machines sont disponibles sur un ou plusieurs niveaux, l'atelier n'est plus un Flow-Shop classique, mais plutôt un Flow-Shop hybride.



FIG. 2.5 : Atelier de Flow-shop

b. Problèmes de Job-shop Appelés également les ateliers à cheminements multiples, ce sont des systèmes de production flexibles qui peuvent gérer des produits variés avec des séquences d'opérations spécifiques et uniques. Chaque job a un ordre de passage unique sur les machines et peut être exécuté plusieurs fois sur la même ressource. Ce modèle est plus flexible que celui qui le précède [1].

Il est également important de mentionner le Job-Shop flexible qui est une extension du job-shop classique. Ce qui le caractérise principalement, c'est la possibilité d'utiliser plusieurs machines pour effectuer une même opération[14].

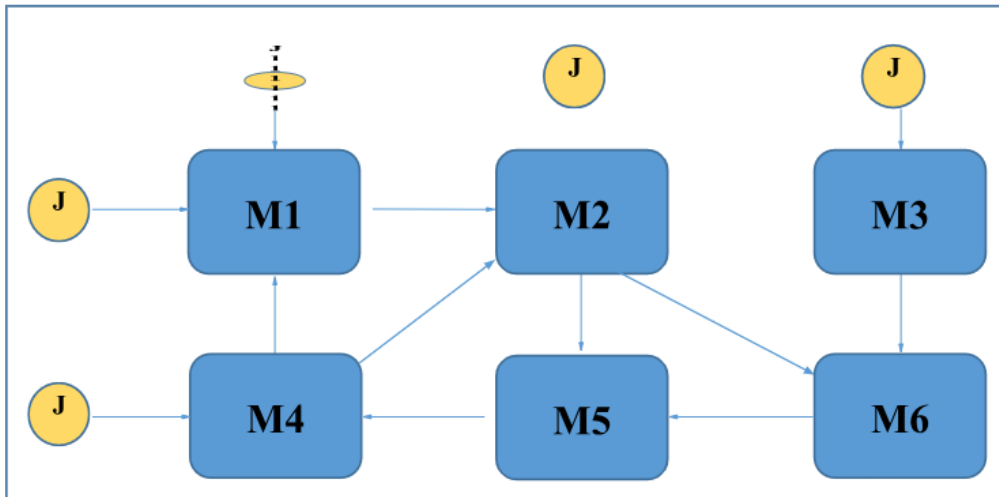


FIG. 2.6 : Atelier Job-shop

2.9 Méthodes de résolution des problèmes d'ordon- nancement

En présence d'un problème d'optimisation, le décideur confronte la difficulté du choix d'une méthode efficace qui fournit une solution optimale en un intervalle du temps rai-

sonnable. Ces méthodes de résolution ont été séparées en deux catégories principales par Hinton J.N.M dans son livre "Scheduling Production Operations" : les méthodes analytiques et les méthodes graphiques, cette classification était moins précise. En 1966, Graham r.l. a introduit la distinction entre méthodes exactes et méthodes approchées que nous allons énumérer dans ce qui suit.

2.9.1 Les méthodes exactes

Une méthode exacte est une méthode qui fournit une solution optimale pour un problème d'optimisation de petites tailles où le nombre de combinaison est limité et peut être exploré en un temps raisonnable[11].

En dépit qu'elles assurent la complétude de la résolution et garantissent toujours une solution optimale, ces méthodes peuvent être coûteuses compte tenu de leur complexité exponentielle qui augmente avec la taille du problème. Parmi les plus connues[4], nous citons :

a. La programmation linéaire

La programmation linéaire est une méthode classique de recherche opérationnelle qui consiste à formuler le problème sous forme de modèles mathématiques linéaire dans le but d'optimiser la fonction objectif en respectant les exigences de l'ordonnement[8].

b. La programmation dynamique

Cette méthode est souvent utilisée pour résoudre des problèmes d'ordonnement avec des contraintes temporelles strictes, elle se base sur le principe de Bellman dont l'objectif est de diviser le problème en sous-problèmes plus petits et les résoudre de manière itérative, pour enfin obtenir la solution globale en combinant les solutions optimales des sous-problèmes[13].

c. La méthode de Branch and Bound La méthode de Branch and Bound implique le placement progressif des tâches sur les ressources, en utilisant une technique de parcours d'arbre, il s'agit de déterminer la configuration optimale en éliminant les branches de l'arbre mènent à une solution non optimale, [16].

2.9.2 Les méthodes approchées

Les méthodes approchées sont des algorithmes itératifs utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation que les méthodes exactes sont incapable de résoudre en un temps raisonnable. Elles cherchent à trouver une solution réalisable sans garantir qu'elle soit optimale, leurs avantages c'est qu'elles peuvent s'appliquer à n'importe quelle classe de problèmes [8]. Les méthodes approchées peuvent être définies e deux classe distincte : Les heuristiques et les méta-heuristiques.

a. Les heuristiques

Les heuristiques représentent une procédure qui exploite 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.

Elles regroupent deux catégories principales : les méthodes constructives et les méthodes de recherche locale, les méthodes constructives, comme leur nom l'indique, consiste à construire itérativement une solution partielle tout en cherchant à optimiser la solution à chaque étape jusqu'à l'obtention de la solution finale. En ce qui concerne les méthodes de recherche locale, une solution candidate est améliorée en explorant localement l'espace des solutions pour aboutir à une solution voisine meilleure. Parmi celles-ci, nous trouvons les méthodes ascendantes et descendantes, [17].

b. Les méta-heuristiques Métaheuristique est un mot composé de deux mots qui viennent du grec, *méta* qui veut dire "au-delà" et qui signifie un plus haut niveau, et *heuristique* (*heuriskein*) qui signifie "trouvé".

Nous pouvons définir une métaheuristique comme étant une procédure utilisée pour l'exploration de l'espace des solutions d'un problème complexe. En fait, c'est une méthode de recherche générale qui vise à résoudre les problèmes d'optimisation difficile et qui peut construire une alternative aux méthodes heuristiques lorsqu'on ne connaît pas l'heuristique spécifique à un problème donné dans le but de trouver une solution réalisable [6].

Il est possible de distinguer trois approches :

- **Approche de voisinage**, ce sont des algorithmes qui partent d'une solution initiale, obtenue d'une manière exacte ou aléatoire, et qui s'éloignent progressivement de celle-ci pour suivre une trajectoire ou un parcours progressif dans l'espace des solutions. On recense dans cette catégorie :
 - Le recuit simple.
 - La recherche dispersée.
 - La recherche Tabou.
- **Approche évolutive**, basée sur une population, ces algorithmes impliquent de travailler sur un ensemble de solutions simultanément et que l'on fait évoluer d'une manière progressive. Dans cette catégorie, sont classés :
 - Les algorithmes génétiques.
 - Les algorithmes par colonies de fourmis.
 - L'optimisation par essaim particulière.
- **Approche hybride**, qui combine les différentes techniques ou concepts provenant d'autres métaheuristiques pour résoudre un problème d'optimisation.

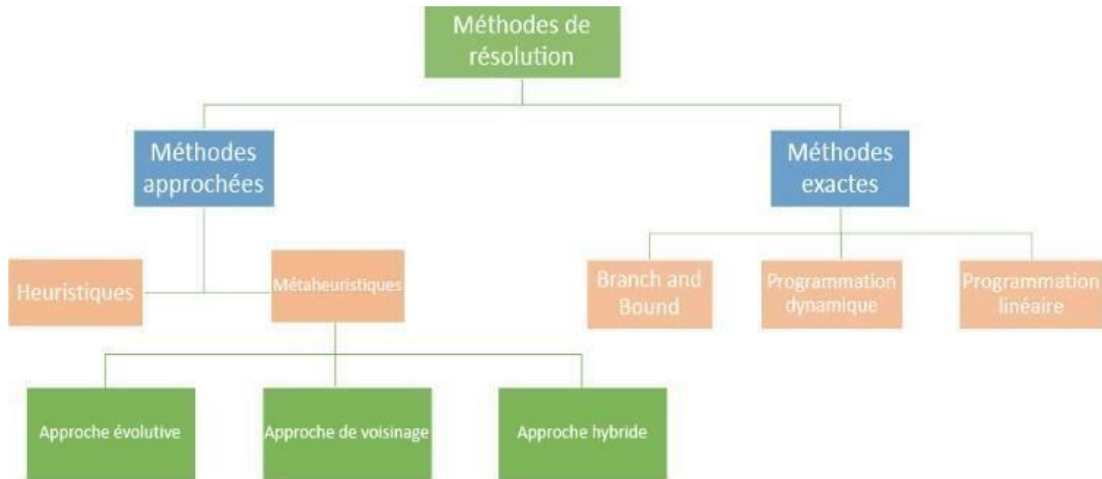


FIG. 2.7 : Méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement

2.9.3 Complexité algorithmique

La complexité algorithmique est un concept fondamental qui permet de mesurer les performances d'un algorithme qui sont évaluées en se basant sur les paramètres suivants [5] :

- Le temps alloué pour l'exécution de l'algorithme : qui diffère selon la taille des données à manipuler ainsi qu'au nombre d'instructions à exécuter.
- Espace mémoire requis pour résoudre le problème.

2.9.4 Complexité problématique

La complexité du problème dépend de sa difficulté intrinsèque ainsi que du nombre d'opérations élémentaires qu'un algorithme doit effectuer pour trouver la solution optimale selon la taille du problème[2].

Les problèmes peuvent être classés en deux classes **P** et **NP**, selon la théorie de la complexité. La classe **P** regroupe les problèmes qui peuvent être résolus par des algorithmes dont le temps d'exécution est borné par un polynôme en fonction de la taille de l'entrée du problème. En d'autres termes, un algorithme est considéré comme polynomial lorsque son temps d'exécution est $O(P(x))$, où **P** est un polynôme et **x** est la taille de l'instance du problème. D'autre part, les problèmes dont la complexité ne peut pas être bornée de manière polynomiale sont classés comme exponentiels et appartiennent à la classe[2] **NP**.

Un problème de décision est un problème qui comprend deux parties, une partie des données et un processus binaire comme réponse possible. Ce type de problème est dit *NP-complet* s'il appartient à la classe **NP** et peut être résolu en un temps exponentiel.

Un problème d'optimisation est un problème de recherche constitué d'un ensemble de données dont chacun représente un ensemble de solutions et à chaque solution on associe une valeur quantitative. À chaque problème d'optimisation, on associe un problème de décision. Un problème d'optimisation est dit *NP-Difficile* si le problème de décision associé est *NP-complet*.

D'après ces définitions, nous pouvons dire que les problèmes d'ordonnement sont *NP-Difficile*, mais nous pouvons les résoudre en utilisant les méthodes présentées précédemment. “

N'hésitez pas à me demander si vous avez besoin de modifications supplémentaires ou si vous avez d'autres questions.

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'ordonnement dans le contexte de la gestion de production, en donnant des définitions issues de la littérature. Nous avons examiné les différents éléments, la formalisation, les modèles et les règles couramment utilisées en matière d'ordonnement.

Nous avons également abordé les méthodes de résolution pour les problèmes d'ordonnement. En dernier point, nous avons appliqué la théorie de complexité pour classer le problème d'ordonnement comme un problème NP-Difficile. Nous avons souligné qu'il est possible de résoudre ce problème en utilisant l'une des méthodes présentées dans ce chapitre. Cependant, avant de procéder, il est crucial d'étudier en détail le système sur lequel nous allons travailler.

Chapitre 3

Étude et méthode de résolution des problèmes à résoudre.

3.1 Introduction

Le présent chapitre se concentre sur l'étude approfondie du système de production de BIOPHARM, nous commençons d'abord par la description du système en mettant en évidence les principaux facteurs et éléments à prendre en compte. Ensuite, nous allons modéliser le problème analytiquement et le classer comme vu dans l'état de l'art, pour enfin choisir la méthode de résolution adéquate qui permet d'obtenir une solution optimale pour ce problème d'ordonnancement, en prenant en considération les exigences spécifiques. Nous évaluerons cette méthode en fonction de critères tels que la complexité, la flexibilité et l'adaptabilité aux contraintes particulières du système. Nous mettrons ensuite en évidence les avantages et les inconvénients de la solution proposée, afin de proposer une amélioration qui vise à optimiser davantage l'ordonnancement.

3.2 Description du système

BIOPHARM dispose de neuf lignes de production dont cinq pour la forme liquide et pâteuse, et qui feront l'objet de notre étude. Nous pouvons présenter ces lignes dans la figure

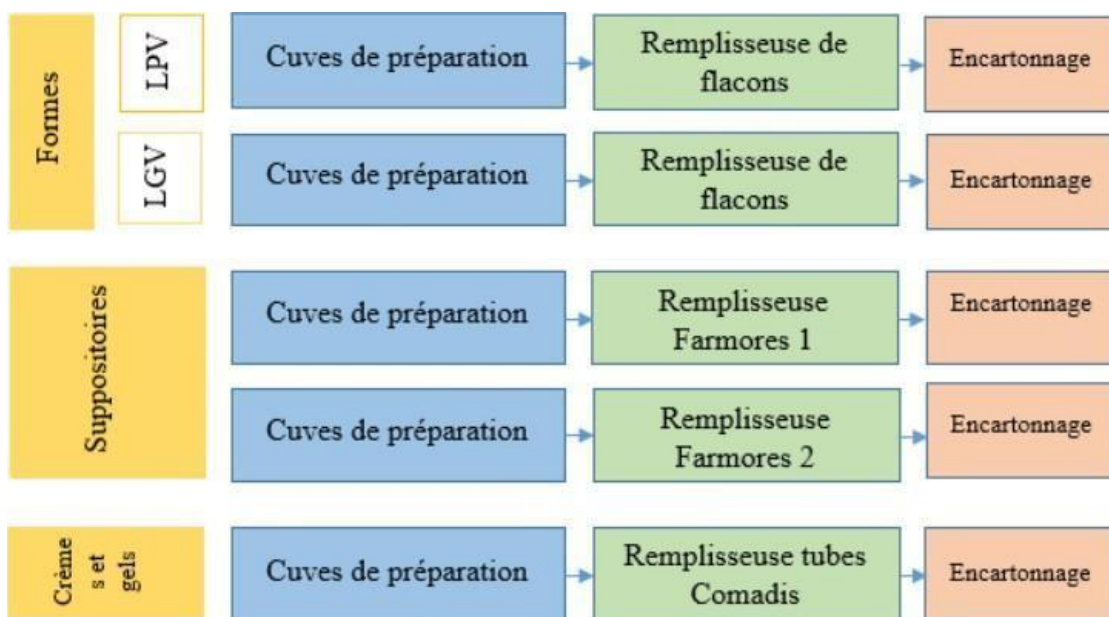


FIG. 3.1 : Atelier Job-shop

- Ce système est constitué de cinq lignes de production de médicaments sous format liquide et pâteuse dont :
 - Deux lignes pour les formes liquides, une pour les liquides de grand volume et une autre pour les liquides de petits volumes.
 - Deux lignes contenant des machines en série et identiques pour les suppositoires.

- Une ligne pour les crèmes et gels.
- Les produits sont stockés entre chaque opération dans un stock S1 supposé illimité, donc nous nous trouvons dans l'étude d'un cas de full-process.

3.3 Définition du problème

- Michael L. Pinedo a mentionné dans son ouvrage *scheduling theory* les différents paramètres qui doivent être étudiés afin de classer tout problème d'ordonnancement, sachant que le nombre de tâches i ainsi que le nombre de machines j est fini.
- Le temps de traitement :
 - C'est le temps de traitement de la tâche i par la machine j , noté p_{ij} .
- La date de sortie :
 - La date au plus tôt à partir de laquelle le traitement d'une tâche i peut commencer. Nous supposons que $temps = 0$ lorsque la ressource est libre et que le traitement peut commencer, notée r_j .
- La date d'échéance :
 - La date finale de livraison du produit. Dans notre cas, elle est généralement fixée au 15^{ème} jour du mois.
- Setup-time :
 - Le temps nécessaire de nettoyage de la machine entre chaque lot de même type de produits. Nous négligeons cela dans cette étude car il est déjà pris en considération dans le temps de traitement, mais nous considérons plutôt le paramètre mentionné ci-dessous :
- Change-over time :
 - Le temps nécessaire de nettoyage des machines après le changement de type de produits. Dans notre cas, nous travaillons sur plusieurs types de produits, donc le change-over time existe.
- Type d'atelier :
 - L'atelier est organisé en deux types :
 - FlowShop F3 : pour les produits en forme liquide et crème et gel, nous avons une ligne de 3 machines en série.
 - Flexible Flowshop FF3 : pour les produits en forme suppositoire, nous avons deux lignes de 3 machines identiques pour chaque ligne et en série.
- Prémptions :

- Il s’agit du fait qu’une tâche peut être interrompue avant d’être terminée. Ce n’est pas le cas de notre atelier, car nous travaillons avec un FlowShop.
- Contrainte de précédence (prec) :
 - La notion de précédence existe dans la procédure de fabrication, mais puisqu’elle est déjà prise en compte par la typologie de FlowShop, nous évitons la redondance et la négligeons.
- Les familles de produits (fmls) :
 - Les produits de la même famille ont la possibilité d’être traités par la même machine sans nécessité d’un setup time, sauf que la transition d’un produit pharmaceutique à un autre appartenant à la même famille exige un setup (nettoyage majeur) en raison de la sensibilité de ces derniers. Donc, ce paramètre est négligé.
- Le traitement en lot (batch(b)) :
 - Nous ne pouvons pas produire plusieurs lots à la fois ($b = 1$) ni exécuter plusieurs tâches à la fois.
- Les temps d’arrêts (Breakdowns) :
 - Une machine peut être en arrêt, c’est-à-dire qu’elle est soit en maintenance préventive, soit indisponible en raison de la configuration des équipes. Ce temps doit être pris en compte lors de la planification.
- Le blocage :
 - Dans le cas du FlowShop classique (sans blocage), la capacité de stockage entre les machines est illimitée, donc une machine est immédiatement disponible pour traiter une nouvelle opération après que l’opération en cours soit terminée (pas d’attente).
- La recirculation :
 - La recirculation des produits dans une même machine est connue dans le cas du job shop, ce qui signifie que les produits avec lesquels nous travaillons passent une seule fois dans une même machine.
- En supposant que les lignes parallèles identiques sont considérées comme des lignes distinctes, nous pouvons définir la typologie de ce problème par la notation suivante : 3|FlowShop|CMax.
- Ce problème est considéré dans la littérature comme étant un problème NP-difficile [9], ce qui a donné lieu à de nombreuses recherches. Les heuristiques semblent être la seule méthode efficace pour résoudre ce type de problèmes, mais elles ne fournissent pas de résultats optimaux.

3.4 Modélisation analytique

Le type et la complexité du problème étant connus, il est nécessaire de modéliser le problème mathématiquement afin de bien définir les paramètres, l'objectif et les contraintes du projet.

3.4.1 Les paramètres

- D_i : ensemble de produits finis.
- L_k : ensemble des lignes de production en flow-shop.
- i : indice de produit, où $i \in 1, \dots, d$.
- j : indice de types de ressources, où $j \in 1, \dots, n$.
- k : indice des lignes de production, où $k \in 1, 2, 3, 4, 5$.
- p_{ik} : temps de traitement d'un lot du produit i sur une ligne k .
- u_i : la couverture du produit i .
- R_{ij} : la quantité de ressources de type j nécessaire à la production de i .
- R_j : la quantité disponible de ressource de type j .
- T : l'intervalle de temps en mois.

3.4.2 Les coefficients

La demande P_i : le nombre de produit i qui doivent être produits durant $t T$. Le nombre de lots J_i : le nombre de lots du produit i à produire durant T , que l'on peut calculer en divisant la demande mensuelle de ce produit par la taille du lot de ce dernier.

$$J_i = \frac{P_i}{\text{BatchSize}}$$

La taille des lots BatchSize_i : la quantité minimale d'un produit i qui peut être produite sans changement de production (change-over). Le changement de production CO_i : le temps de nettoyage nécessaire pour passer d'un produit à un autre sur la même ligne de production. La cadence de ligne c_k : représente le rythme de la production par ligne.

3.4.3 Les variables de décision

La date de début de production d'un lot : on note C_i , la date de début de production d'un

lot du produit i . La date de fin de production d'un lot : on note F_i , la date de fin de production d'un lot du produit i , que l'on peut obtenir à travers l'équation suivante :

$$F_i = C_i + p_i$$

3.4.4 La fonction objective

On vise à utiliser les ressources d'une façon optimale, donc, d'une façon indirecte minimiser le temps total d'exécution de l'ensemble des opérations à ordonnancer qui est connu sous le nom **Makespan**. Minimiser (Makespan) = $\min (\max_{i \in P} (F_i))$

3.4.5 Les contraintes

- Les contraintes sur le temps :
- Le premier produit doit se positionner sur l'origine des temps $t = 0 : C_0 = 0$.
- Le début de la production du produit $i + 1$ doit commencer après la fin de la production du produit i :

$$C_{i+1} \geq C_i + p_i + CO_i.$$

- Le temps de production journalier ne doit pas dépasser la cadence de chaque ligne :

-

$$\sum_{i \in P} (batch_i \cdot ime_i \cdot J_i) + \sum_{i \in P} CO_i \leq \sum_{k \in K} C_k.$$

- Chaque ligne traite un seul lot de produit à la fois, et un lot du produit n'est traité que par une ligne.
- Les contraintes de ressources :
- Les ressources disponibles doivent couvrir les besoins : $\sum_{i \in P} R_{ij} \leq R_j$ pour $j = 1, n$.

Après avoir minutieusement recensé les spécifications du problème d'ordonnancement des lignes de production, il est devenu évident que nous nous trouvons dans un cas de figure particulier : celui d'un flowshop où le temps d'attente entre les différentes machines est négligeable, voire inexistant. De plus, les produits suivent un full-process sans être stockés entre chaque étape. À la lumière de ces constatations, nous pouvons conclure que nous sommes face à une configuration spécifique : celle d'un atelier à une seule machine. Cette caractéristique particulière aura une influence significative sur les solutions que nous proposerons pour optimiser l'efficacité de cet environnement de production.

3.5 Démarche de résolution

Pour parvenir à une solution optimale, il est essentiel de mettre en place une démarche de résolution structurée et méthodique. Pour cela, nous allons procéder à l'utilisation d'une heuristique basée sur la règle TOM pondéré (Temps Opérateur Minimum Pondéré), connue également sous le nom de la règle de SMITH [12] où la règle du poids.

L'idée principale derrière cette heuristique est de prendre en compte à la fois le temps opératoire des produits et leur importance relative. Chaque produit se voit attribuer un poids qui reflète sa priorité par rapport aux autres produits, dans notre cas, la pondération choisie est la couverture. Cette décision est motivée par la nature particulière de notre domaine d'étude, où les produits médicaux doivent être disponibles en permanence.

3.5.1 La fonction objective

On vise à utiliser les ressources d'une façon optimale, donc, d'une façon indirecte minimiser le temps total d'exécution de l'ensemble des opérations à ordonnancer qui est connu sous le nom **Makespan**. Minimiser (Makespan) = $\min (\max_{i \in P} (C_i + p_i))$

3.6 Les contraintes

Les contraintes sur le temps :

3.6.5 Le premier produit doit se positionner sur l'origine des temps $t = 0 : C_0 = 0$.

3.6.6 Le début de la production du produit $i + 1$ doit commencer après la fin de la production du produit $i : C_{i+1} \geq C_i + p_i + CO_i$.

3.6.7 Le temps de production journalier ne doit pas dépasser la cadence de chaque ligne :

$$\sum_{i \in P} (\text{batch}_i \cdot \text{time}_i \cdot \sum J_i) + \sum_{i \in P} CO_i \leq \sum_{k \in K} C_k$$

3.6.8 Chaque ligne traite un seul lot de produit à la fois, et un lot du produit n n'est traité que par une ligne.

Les contraintes de ressources :

3.6.9 Les ressources disponibles doivent couvrir les besoins : $\sum_{i \in P} R_{ij} \leq R_j$ pour $j = 1, n$.

Après avoir minutieusement recensé les spécifications du problème d'ordonnancement des lignes de production, il est devenu évident que nous nous trouvons dans un cas de figure particulier : celui d'un flowshop où le temps d'attente entre les différentes machines est négligeable, voire inexistant. De plus, les produits suivent un full-process sans être stockés entre chaque étape. À la lumière de ces constatations, nous pouvons conclure que nous sommes face à une configuration spécifique : celle d'un atelier à une seule machine. Cette caractéristique particulière aura une influence significative sur les solutions que nous proposerons pour optimiser l'efficacité de cet environnement de production.

3.7 Démarche de résolution

Pour parvenir à une solution optimale, il est essentiel de mettre en place une démarche de résolution structurée et méthodique. Pour cela, nous allons procéder à l'utilisation d'une heuristique basée sur la règle TOM pondéré (Temps Opératoire Minimum Pondéré), connue également sous le nom de la règle de SMITH [12] où la règle du poids.

L'idée principale derrière cette heuristique est de prendre en compte à la fois le temps opératoire des produits et leur importance relative. Chaque produit se voit attribuer un poids qui reflète sa priorité par rapport aux autres produits, dans notre cas, la pondération choisie est la couverture. Cette décision est motivée par la nature particulière de notre domaine d'étude, où les produits médicaux doivent être disponibles en permanence sur le marché.

3.7.1 Fonctionnement de la règle du TOM pondéré

Attribution des poids : Chaque produit est associé à un poids qui reflète l'importance relative des produits dans le processus de production. Dans cette étude, le poids représente la couverture des stocks, qui est un critère essentiel et qui est défini comme étant le nombre de périodes pour lesquelles les stocks actuels peuvent soutenir les ventes [3]. Ainsi, les produits médicaux ayant une forte demande et une importance stratégique élevée peuvent se voir attribuer des poids plus élevés.

- a. **Calcul du temps opératoire pondéré** Pour chaque produit i , nous allons calculer le temps de traitement pondéré en divisant le temps opératoire du produit (noté p_{ij}) par sa couverture (notée u_i).
- b. **Ordonnement des produits** Cette règle stipule que les produits ayant le temps de traitement pondéré le plus faible ont la priorité sur ceux ayant un temps de traitement pondéré plus élevé. Cela se traduit par le fait que les tâches avec un temps opératoire plus petit et qui ont un taux de couverture inférieur à d'autres produits sont considérées comme étant des tâches critiques et nécessitant une attention particulière.

ID_Produit	Nom_Produit	Temps de traitement	Taux de couverture	Temps opératoire pondéré	Ordre de passage
NS288	Nasalast spray nasal	0,589521	3	0,196507	2
SZ128	Somazina gouttes	0,863251	2	0,4316255	4
RN062	Rynza toux sirop	0,1723658	2	0,0861829	1
RN161	Rynza Nasal	0,7823695	3	0,2607898	3

TAB. 3.1 : Exemple d'ordonnement en suivant la règle de TOM pondéré

3.7.2 Pseudocode de la méthode

Un pseudocode est une façon de décrire un algorithme de façon simplifiée avec un langage naturel sans l'utilisation d'un langage de programmation, nous allons utiliser cette notion pour décrire l'heuristique basée sur la règle du temps opératoire pondéré.

Algorithme 1 : Structure générale de l'algorithme

Input : Produits, Demande, Lignes.
Output : Lots, Plan d'ordonnancement.
Début
Générer les lots
Initialiser les paramètres
Initialiser une matrice $S(s_{i,j})$ de listes vides
Pour ligne ϵ Lignes faire :
 while ($n \leq$ (nombre de produit)! **Do** :
 Calcul du temps opératoire pondéré
 Ordonner le temps opératoire pondéré par ordre décroissant
 Calcul de date de début C_i
 Calcul de date de fin F_i
 Affecter le produit à la matrice
 Fin
Fin

FIG. 3.2 : Structure générale de l'algorithme 1

3.8 Critique de la méthode

Bien que la démarche de résolution proposée soit adéquate pour notre problème et présente certains avantages, elle n'est certainement pas exempte d'inconvénients

3.8.1 Les inconvénients

- La subjectivité dans l'attribution des poids, les résultats de l'ordonnancement sont considérés comme étant moins objectifs et moins fiables suite à l'assignation des poids qui est basée sur des critères subjectifs.
- Manque de flexibilité, la méthode peut être moins adaptable aux modifications et aux imprévus car il est difficile d'ajuster les poids en fonction des changements dans les conditions du projet, à titre d'exemple : le calendrier du travail et la maintenance préventive.
- Se concentre principalement sur les aspects temporels et néglige la disponibilité des ressources.

3.8.2 Les avantages

- Prise en compte de l'importance relative des produits, ce qui fait que certains produits auront un impact plus significatif sur la planification que d'autres.
- Les pondérations peuvent être ajustées selon les besoins et les objectifs de l'entreprise, ce qui rend la méthode plus flexible.

- Relativement simple à mettre en œuvre par rapport à d'autres méthodes d'ordonnement plus complexes, elle ne nécessite pas de modélisations mathématiques sophistiquées ou d'algorithmes complexes.

3.8.3 Amélioration de la méthode de résolution

a. Programmation linéaire

La programmation linéaire peut présenter une approche mathématique appropriée si on dispose de contraintes plus complexes ou on souhaite prendre en compte des objectifs multiples. Cependant, vu que nous sommes dans le cas d'un problème de taille moyenne, cette solution de complexité exponentielle peut être complexe et la résolution des problèmes de grandes tailles en l'utilisant est difficile.

b. Métaheuristiques

Afin de trouver une solution optimale, nous pouvons utiliser des métaheuristiques telles que les algorithmes génétiques ou même la recherche tabou qui aident à explorer l'espace des solutions. Cependant, nous évitons ce type d'amélioration en raison de la sensibilité des paramètres choisis, du temps que prend l'exécution de ces algorithmes ainsi que de leur complexité exponentielle.

c. Amélioration mathématique

C'est l'amélioration la plus adéquate pour notre problème, car elle permet de prendre en compte d'autres aspects importants dans le processus d'ordonnement en utilisant des tests mathématiques sans passer d'un problème de complexité moyenne à un problème de complexité forte. Dans notre cas, nous allons ajouter une contrainte supplémentaire, qui est la disponibilité des ressources, afin d'atteindre notre objectif qui est la minimisation du temps total d'exécution en optimisant l'utilisation des ressources disponibles de manière efficace. Pour cela, nous allons procéder à l'utilisation d'un calendrier de disponibilité des lignes de production. Dans la même journée, nous pourrions planifier le traitement de plusieurs lots à condition que la somme de leur temps opératoires soit inférieure à la disponibilité de la ligne dans cette journée.

Après amélioration, nous pouvons décrire l'heuristique par le pseudocode suivant :

Algorithme 2 : Structure générale de l'algorithme

```

Input : Produits, Demande, Lignes, Activité,
Output : Lots, Plan d'ordonnancement.
Début
Générer les lots
Initialiser les paramètres
Initialiser une matrice  $S(S_{ij})$  de listes vides
if (Activité >0) Do
  Pour ligne  $\in$  Lignes faire :
    while (  $n \leq$  (nombre de produit) ) Do :
      Calcul du temps opératoire pondéré
      Ordonner le temps opératoire pondéré par ordre décroissant
      Calcul de date de début  $C_i$ 
      Calcul de date de fin  $F_i$ 
      Affecter le produit à la matrice
      Soustraire le temps opératoire de l'activité
    Fin
  Fin
Else
  | Passer à la journée suivante
Fin

```

FIG. 3.3 : Structure générale de l'algorithme 2

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entrepris une étude approfondie du système de production au sein de BIOPHARM, en décrivant ses caractéristiques clés. Nous avons ensuite procédé à une modélisation mathématique rigoureuse de ce système qui nous a permis de proposer une méthode de résolution du problème identifié.

Cependant, nous reconnaissons que les heuristiques basées sur des règles de priorité présentent certaines limitations et peut ne pas être entièrement optimale dans tous les cas, c'est pour cela nous avons souligné les lacunes qu'elles peuvent présenter. Et en- fin nous avons suggéré une amélioration à cette méthode pour l'intégration des données supplémentaires.

Chapitre 4

Implémentation et résultats

4.1 Introduction

Après avoir établi la partie théorique et mathématique, il est nécessaire de passer à l'implémentation que nous allons détailler dans ce chapitre, en précisant les outils utilisés et en présentant les résultats obtenus tout en les comparant avec les résultats de l'entreprise.

4.2 Les outils utilisés

4.2.1 Outils de stockage de données

ERP SAGE X3

est un logiciel de gestion intégré utilisé par BIOPHARM industrie afin de gérer les flux d'information de cette dernière, cet outil a été utilisé pour l'extraction des données relatives à notre problème et les stocker dans Microsoft Excel pour faciliter les manipulations.



4.2.2 langages de programmation

a. Python 3.10

python est un langage de programmation polyvalent connu par sa syntaxe claire et concise, ce qui a motivée notre choix pour ce langage dans l'implémentation du programme, la lisibilité du code python facilite la compréhension et la collaboration, ce qui est essentiel pour un développement évolutif et efficace.



4.2.3 Environnement de développement

b. Spyder

C'est un environnement intégré spécialement conçu pour le langage de programmation Python, il fournit un ensemble complet d'outils et de fonctionnalités pour faciliter le développement, le débogage et l'analyse de code Python.



4.3 Les bibliothèques

xlwings : une bibliothèque open-source qui permet d'interagir avec Microsoft Excel à partir du langage Python.

Pandas : Pandas est une bibliothèque open-source populaire et puissante pour la manipulation et l'analyse des données en Python.

Plotly : est une bibliothèque de visualisation et de création des graphiques.

La structuration des données

Après avoir récupéré les données, les nettoyé et trié, nous les avons regroupées dans un tableur Excel afin de faciliter la manipulation. Les données utilisées sont séparées en deux classes :

1. Données statiques : ce sont les données qui ne changent pas au cours du temps et sont importées directement de l'ERP. Parmi ces données, nous aurons besoin de :

Les produits, Les lignes, Les temps opératoires, La taille du lot. **2. Données dynamiques** : ce sont les données qui changent d'un mois à un autre, issues de MRP (Material Requirements Planning) ou d'autres sources. Nous aurons besoin de :

La configuration des équipes (activité), La demande, La couverture.

Après quelques manipulations avec Python sur les données, nous aboutirons à une table présentée dans la figure 4.1 qui regroupe tous les paramètres dont nous avons besoin pour établir le plan d'ordonnancement.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	CodePF	DésignationPF	batchtime	Couverture	Demande	Taille_du_lo	Ligne	DemandeEn	TOP
5	FU098	FUCIDINE pommade	11,8930556	2	225878,4	39215	C&G	6	0,16816536
3	DF216	Dermofix creme	10,2592593	2	24000	25000	C&G	1	0,19494585

FIG. 4.1 : Données d'entrée du plan d'ordonnancement

4.4 L'implémentation

Dans cette partie, nous avons mis en œuvre la solution informatique que nous avons conçue pour résoudre ce problème d'ordonnancement. Cette étape consiste à transformer notre algorithme en un code fonctionnel et à l'exécuter sur un environnement informatique qui est Spyder.

Pour cela, nous avons commencé par regrouper les données nécessaires à partir de l'ERP SAGE X3 et des fichiers Excel. Ensuite, nous avons effectué les manipulations et les traitements requis sur ces données afin de les préparer à l'analyse.

Une fois les données préparées, nous avons procédé à l'exécution de notre solution informatique. Nous avons lancé notre code dans l'environnement Spyder pour obtenir les résultats attendus.

Enfin, nous avons pu observer les résultats de notre implémentation, analyser les données traitées et évaluer la pertinence de notre solution par rapport aux objectifs du projet. Cette étape nous a permis de vérifier si notre solution informatique est capable de résoudre efficacement le problème d'ordonnancement et si elle répond aux critères de performance et de pertinence définis dans le cadre du projet.

4.5 Résultats

Après l'exécution du code, nous avons obtenu deux résultats, dont l'un est destiné à la lecture vu sa lisibilité et clarté, le diagramme de Gantt, et un plan d'ordonnancement où nous trouvons les détails de chaque lot avec date de début et de fin de production, nous présentons ci-dessous diagramme de Gantt de la ligne CG du mois de mars.

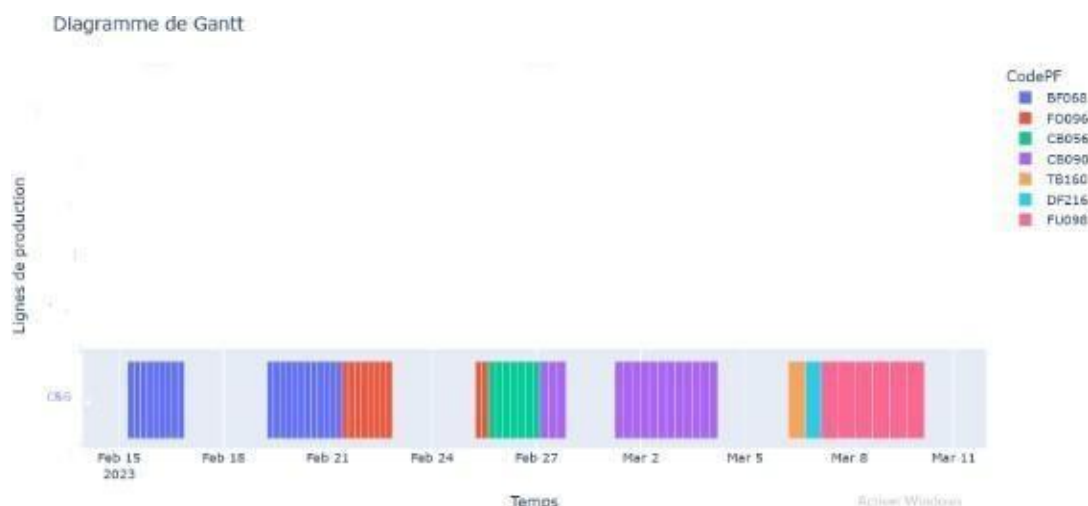


FIG. 4.2 : Diagramme de GANTT

En plus du diagramme de Gantt, nous avons également recours à un plan d'ordonnancement représenté dans la figure, délivré par le code, qui nous fournit des informations précises sur les dates de début et de fin des différents lots.

Index	CodePF	Date de début	Date de fin
0	BF068	2023-02-15 06:00:00	2023-02-15 10:20:00
1	BF068	2023-02-15 10:20:00	2023-02-15 14:40:00
2	BF068	2023-02-15 14:40:00	2023-02-15 19:00:00
3	BF068	2023-02-15 19:00:00	2023-02-15 23:20:00
4	BF068	2023-02-15 23:20:00	2023-02-16 03:40:00
5	BF068	2023-02-16 03:40:00	2023-02-16 08:00:00
6	BF068	2023-02-16 08:00:00	2023-02-16 12:20:00
7	BF068	2023-02-16 12:20:00	2023-02-16 16:40:00
8	BF068	2023-02-16 16:40:00	2023-02-16 21:00:00
9	BF068	2023-02-19 06:00:00	2023-02-19 10:20:00
10	BF068	2023-02-19 10:20:00	2023-02-19 14:40:00
11	BF068	2023-02-19 14:40:00	2023-02-19 19:00:00
12	BF068	2023-02-19 19:00:00	2023-02-19 23:20:00
13	BF068	2023-02-19 23:20:00	2023-02-20 03:40:00
14	BF068	2023-02-20 03:40:00	2023-02-20 08:00:00
15	BF068	2023-02-20 08:00:00	2023-02-20 12:20:00
16	BF068	2023-02-20 12:20:00	2023-02-20 16:40:00
17	BF068	2023-02-20 16:40:00	2023-02-20 21:00:00

FIG. 4.3 : Quelques lignes du Plan d’ordonnancement du mois de mars

4.6 Comparaison des résultats

Étant donné que nous travaillons sur un système de production à une machine, les résultats sont rapprochés en matière du temps. Néanmoins, l’ordonnancement manuel effectué au sein de l’industrie ne prend pas en compte les heures d’activité des lignes de production, par conséquent, les ressources machines sont mal exploitées, ce qui entraîne des retards et des coûts supplémentaires.

Nous avons pu concevoir une solution lisible et claire comparée avec l’Output de la méthode suivie par BIOPHARM qui donne un résultat illisible et encombré.

	Date début	Date fin	N°Sema line (calend aire)	Code Ligne	Désignation PF	Code PF	N° Lot	Taille du lot	temps opérateur
24	19/2/23 6:00	19/2/23 10:16	8	LLPV3	Nasalast spray nasal	NS228	023	11764	0,177824074
25	19/2/23 10:16	19/2/23 14:32	8	LLPV3	Nasalast spray nasal	NS228	024	11764	0,177824074
26	19/2/23 14:32	19/2/23 18:48	8	LLPV3	Nasalast spray nasal	NS228	025	11764	0,177824074
27	19/2/23 18:48	19/2/23 21:48		LLPV3	Change-over time between batch	C/O MC			0,125
28	19/2/23 21:48	20/2/23 22:12	8	LLPV3	Celétasone 0.05% gouttes buv	CT119	183	20000	1,016975309
29	20/2/23 22:12	21/2/23 22:00	8	LLPV3	Celétasone 0.05% gouttes buv	CT119	184	20000	0,816975309
30	21/2/23 22:00	22/2/23 22:00	8	LLPV3	Celétasone 0.05% gouttes buv	CT119	185	20000	1,016975309
31	22/2/23 22:00	23/2/23 9:00		LLPV3	Change-over time between batch	C/O MC			0,458333333
32	23/2/23 9:00	23/2/23 22:00	8	LLPV3	somazina gouttes	SZ128	311	20000	0,273148148
33	23/2/23 22:00	26/2/23 6:00		SGRN7	Weekend				
34	26/2/23 6:00	26/2/23 22:00	9	LLPV3	somazina gouttes	SZ128	312	20000	0,273148148
35	26/2/23 22:00	27/2/23 9:00		LLPV3	Change-over time between batch	C/O MC			0,458333333
36	27/2/23 9:00	27/2/23 13:10	9	LLPV3	rynza toux sirop	RN062	020	6666	0,173928571
37	27/2/23 13:10	27/2/23 17:20	9	LLPV3	rynza toux sirop	RN062	021	6666	0,173928571
38	27/2/23 17:20	27/2/23 21:31	9	LLPV3	rynza toux sirop	RN062	022	6666	0,173928571
39	27/2/23 21:31	28/2/23 9:41	9	LLPV3	rynza toux sirop	RN062	023	6666	0,507261905
40	28/2/23 9:41	28/2/23 13:52	9	LLPV3	rynza toux sirop	RN062	024	6666	0,173928571
41	28/2/23 13:52	28/2/23 18:02	9	LLPV3	rynza toux sirop	RN062	025	6666	0,173928571
42	28/2/23 18:02	28/2/23 21:02		LLPV3	Change-over time between batch	C/O MC			0,125
43	28/2/23 21:02	1/3/23 13:11	9	LLPV3	RYNZA nasal	RN161	067	15000	0,672619048
44	1/3/23 13:11	1/3/23 21:19	9	LLPV3	RYNZA nasal	RN161	068	15000	0,339285714
45	1/3/23 21:19	2/3/23 8:19		LLPV3	Change-over time between batch	C/O MC			0,458333333
46	2/3/23 8:19	2/3/23 14:53	9	LLPV3	Rynza mal de gorge	RG323	101	10000	0,273148148
47	2/3/23 14:53	5/3/23 6:00		SGRN7	Weekend				

FIG. 4.4 : Plan d’ordonnancement actuel

Nous pouvons résumer ces points dans Ce tableau comparatif 4.1

Méthode classique	Solution informatique
Absence de démarche	Suit une démarche claire
Prend beaucoup de temps (de 3 à 5 jours)	Prend 30 min maximum
Se fait manuellement	Se fait automatiquement
Ne prend pas en compte toutes les contraintes temporelles	Prend en compte les contraintes temporelles
Taux d’erreur élevé	Taux d’erreur minime
Résultat surchargé	Résultat bien lisible

TAB. 4.1 : Comparaison entre la méthode classique et la solution informatique

4.7 Conclusion

La mise en œuvre d’une solution informatique en ordonnancement représente une véritable liaison avec l’innovation technologique. L’adoption de cette approche novatrice garantie de multiples enjeux, le renforcement de capacité à répondre aux demandes changeantes du marché, l’optimisation du processus d’ordonnancement et l’amélioration de l’efficacité.

Conclusion

Conclusion générale

L'ordonnancement revêt d'une importance cruciale dans les opérations de production et de planification au sein des entreprises. En effet, il joue un rôle essentiel dans l'optimisation des ressources, la réduction des coûts, l'amélioration de l'efficacité et la satisfaction de la demande.

La principale contribution de notre travail consigné dans ce mémoire est la résolution de l'un des problèmes de l'ordonnancement d'un système à une machine par les règles de priorité. L'ordonnancement est un problème qui a été largement étudié et est considéré comme extrêmement complexe. Il est classé parmi les problèmes combinatoires difficiles, ce qui signifie qu'il est particulièrement ardu à résoudre.

Cette complexité est due à l'explosion combinatoire, c'est-à-dire que le nombre de solutions possibles croît de manière exponentielle avec la taille du problème. Face à cette complexité, l'utilisation de méthodes exactes pour obtenir des solutions optimales semble peu réaliste. C'est pourquoi le recours à des méthodes approchées, telles que les heuristiques, est devenu incontournable.

Pour résoudre notre problème, nous avons procédé au développement d'une heuristique basée sur une règle de priorité utilisée couramment qui est la règle du temps opératoire minimum pondéré, la pondération étant un critère subjectif, nous avons choisi la couverture vu l'importance des produits médicaux et la nécessité de ces derniers.

En conclusion, notre travail a apporté une contribution significative à la résolution du problème d'ordonnancement d'un système à une machine en utilisant une heuristique basée sur la règle de priorité, en particulier la règle du temps opératoire minimum pondéré.

En choisissant la pondération de la couverture en raison de l'importance des produits médicaux et de leur nécessité, nous avons développé une heuristique qui a permis d'optimiser l'utilisation des ressources et d'accélérer le processus d'ordonnancement. Grâce à notre solution graphique sous la forme d'un diagramme de Gantt, il est devenu plus facile de visualiser et de suivre le déroulement des tâches.

Les résultats obtenus grâce à notre approche ont été optimaux. Les ressources ont été exploitées de manière maximale, ce qui a contribué à la réduction des coûts et à l'amélioration de l'efficacité globale du système. De plus, la satisfaction de la demande a été renforcée grâce à la gestion plus efficace des délais de production.

Il convient de souligner que l'ordonnancement est un problème complexe et difficile, en raison de l'explosion combinatoire et du nombre exponentiel de solutions possibles. Dans ce contexte, l'utilisation de méthodes exactes pour obtenir des solutions optimales s'avère peu réaliste. Les méthodes approchées, telles que les heuristiques, se révèlent donc indispensables pour parvenir à des solutions pratiques et réalisables dans des délais raisonnables.

En somme, notre travail démontre l'importance cruciale de l'ordonnancement dans les opérations de production et de planification au sein des entreprises. Grâce à notre heuristique basée sur la règle de priorité et notre solution graphique, nous avons apporté une contribution significative à la résolution d'un problème complexe et nous avons obtenu des résultats améliorés en termes d'optimisation des ressources, de réduction des coûts, d'amélioration de l'efficacité et de satisfaction de la demande.

Bibliographie

- [1] Boukef, H. B. B. O. (2009). *Sur l'ordonnancement d'ateliers job-shop flexibles et flow-shop en industries pharmaceutiques : optimisation par algorithmes génétiques et essais particuliers* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie)).
- [2] Stephen A Cook. The complexity of theorem-proving procedures. In *Logic, Automata, and Computational Complexity: The Works of Stephen A. Cook*, pages 143–152. 2023.
- [3] Midler, C., Garel, G., & Giard, V. (2006). Management de projet et gestion des ressources humaines. Ronald L Graham. Bounds for certain multiprocessing anomalies. *Bell system technical journal*, 45(9) :1563–1581, 1966.
- [4] Kerzner, H. (2017). *Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling*.
- [5] John Wiley & Sons. Amaria KHEDIM Née OUIS. *Métaheuristique à base de colonies d'abeilles pour l'ordonnancement des ateliers de type Job shop*. PhD thesis.
- [6] KRAM, Z. (2019). *Insertion d'une opération dans un problème d'ordonnancement a machines parallèles* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA FACULTE DES MATHEMATIQUES ET DE L'INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE-Spécialité : Informatique Décisionnelle et Optimisation).
- [7] Yazid Mati.(2002).*Les problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de production automatisés : Modèles, complexité et approches de résolution*. Université Paul Verlaine-Metz., PhD thesis.
- [8] MEGUIRECHE, S. (2019). *Ordonnancement des systèmes de production flexible* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA FACULTE DES MATHEMATIQUES ET DE L'INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE-Spécialité : Informatique Décisionnel et Optimisation).
- [9] Pinedo, M. (2005). *Planning and scheduling in manufacturing and services*. Springer (New York).
- [10] Shoshani, A., & Rotem, D. (Eds.). (2009). *Scientific data management: challenges, technology, and deployment*. CRC Press.
- [11] Smith, W. E. (1956). " Various optimizers for single-stage production", Naval Res. Logist. Quart. 3.

Bibliographie

- [12] Teghem, J. (2010). *Metaheuristics. From Design to Implementation*, El-Ghazali Talbi. John Wiley & Sons Inc.(2009). XXI+ 593 pp., Publication 978-0-470-27858-1.
- [13] TRANVOUEZ, B. E. E. *Ordonnancement d'atelier coopératif et réactif : une approche multi-agents.*
- [14] Lopez, P., Haudot, L., Sicard, M., & Esquirol, P. (1995). Constraint-based approach to design a DSS for scheduling. In *3rd International Conference on the Practical Application of Prolog (PAP'95)* (pp. 405-422).
- [15] Cottet, F., Delacroix, J., Kaiser, C., & Mammeri, Z. (2000). *Ordonnancement temps réel: cours et exercices corrigés* (pp. 206-p).
- [16] Tercinet, F. (2004). *Méthodes arborescentes pour la résolution des problèmes d'ordonnancement, conception d'un outil d'aide au développement* (Doctoral dissertation, Tours).
- [17] El-Arbi, C. (1978). Une heuristique pour le problème de l'arbre de Steiner. *RAIRO-Operations Research*, 12(2), 207-212.
- [18] Wolosewicz, C. (2008). *Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).

Annexes

Annexe A

A.1 Solution d'ordonnancement

```
function ExhaustiveFlowshop(flowshop_instance):
    meilleur_temps_total = +∞
    meilleure_sequence = []
    permuter toutes les permutations possibles des tâches
        temps_total = calculer_temps_total(flowshop_instance, permutation)
        si temps_total < meilleur_temps_total alors
            meilleur_temps_total = temps_total
            meilleure_sequence = permutation
    retourner meilleure_sequence

function calculer_temps_total(flowshop_instance, sequence):
    // Calculer le temps total pour une séquence donnée
    // en utilisant la logique spécifique au problème

function PermutationFlowshop(flowshop_instance):
    taille_sequence = nombre de tâches dans l'instance
    meilleure_sequence = []
    meilleur_temps_total = +∞

    // Générer la première permutation initiale
    sequence_initiale = [1, 2, 3, ..., taille_sequence]

    PermuterFlowshop(sequence_initiale, taille_sequence, meilleure_sequence, meilleur_temps_total)

    retourner meilleure_sequence

function PermuterFlowshop(sequence, taille, meilleure_sequence, meilleur_temps_total):
    si taille = 1 alors
        // Évaluer le temps total pour la séquence courante
        temps_total = evaluer_temps_total(flowshop_instance, sequence)

        si temps_total < meilleur_temps_total alors
            meilleure_sequence = copie de sequence
            meilleur_temps_total = temps_total
    sinon
        pour i de 0 à taille-1 faire
            PermuterFlowshop(sequence, taille-1, meilleure_sequence, meilleur_temps_total)

            si taille est impair alors
                échanger les éléments i et taille-1 de la séquence
            sinon
                échanger les éléments 0 et taille-1 de la séquence
    fin pour
```

Annexe A.

```
%algorithme glouton
function PermutationFlowshopGourmand(flowshop_instance):
    nombre_tâches = nombre de tâches dans l'instance
    meilleure_séquence = []
    meilleur_temps_total = +∞

    pour tâche de 1 à nombre_tâches faire
        insérer tâche à la position qui minimise le temps total

    retourner meilleure_séquence

function insérer(tâche, séquence):
    meilleur_temps_total = +∞
    meilleure_position = 0

    pour position de 0 à longueur(séquence) faire
        séquence_temporaire = insérer tâche à la position dans séquence
        temps_total = évaluer_temps_total(flowshop_instance, séquence_temporaire)

        si temps_total < meilleur_temps_total alors
            meilleur_temps_total = temps_total
            meilleure_position = position

    insérer tâche à la meilleure_position dans séquence

branch and bound
function PermutationFlowshopExhaustif(flowshop_instance):
    nombre_tâches = nombre de tâches dans l'instance
    meilleure_séquence = []
    meilleur_temps_total = +∞
    séquence_courante = []

    PermuterFlowshopExhaustif(séquence_courante, nombre_tâches, meilleure_séquence, meilleur_temps_total)

    retourner meilleure_séquence

function PermuterFlowshopExhaustif(séquence_courante, taille_restante, meilleure_séquence, meilleur_temps_total):
    si taille_restante = 0 alors
        temps_total = évaluer_temps_total(flowshop_instance, séquence_courante)

        si temps_total < meilleur_temps_total alors
            meilleure_séquence = copie de séquence_courante
            meilleur_temps_total = temps_total
    sinon
        pour tâche de 1 à taille_restante faire
            ajouter tâche à séquence_courante

            // Vérifier si la solution partielle actuelle peut être améliorée
            si évaluer_temps_total(flowshop_instance, séquence_courante) < meilleur_temps_total alors
                PermuterFlowshopExhaustif(séquence_courante, taille_restante - 1, meilleure_séquence, meilleur_temps_total)

            supprimer la dernière tâche de séquence_courante
```

ملخص

يركز مشروع التخرج هذا على حل مشكلة الجدولة داخل وحدة الانتاج. تعد الجدولة ذات أهمية قصوى في مجال إدارة الانتاج والخدمات اللوجستية إنه يلعب دوراً أساسياً في تحسين العمليات وفي البحث عن الكفاءة التشغيلية ، فقد اصبح الاخير اكثر تعقيدا بسبب التقلبات في الطلب والقيود الاخرى ، ولهذا السبب ، انتقلنا إلى استخدام الاستدلال على اساس قاعدة الحد الادنى المرجح لوقت التشغيل من أجل تحديد تسلسل معالجة الدفعات مع مراعاة القيود المفروضة.

كلمات مفتاحية : الجدولة تخطيط الانتاج ، تحسين ، طريقة تقريبية ، قيود

Résumé

Ce projet de fin d'études se concentre sur la résolution d'un problème d'ordonnement au sein d'une unité de production. L'ordonnement revêt une importance capitale dans le domaine de la gestion de la production et de la logistique. Il joue un rôle essentiel

dans l'optimisation des processus et dans la recherche de l'efficacité opérationnelle, ce dernier devient de plus en plus complexe en raison des fluctuations de la demande et d'autres contraintes, pour cette raison, nous avons procédé à l'utilisation d'une heuristique basée sur la règle du temps opératoire minimum pondéré afin de déterminer la séquence de traitement des lots tout en respectant les contraintes imposées.

Mots clés : Ordonnement, Optimisation, Planification de la production, Heuristique, Contraintes.

Abstract

This final year project focuses on solving a scheduling problem within a production unit. Scheduling is of vital importance in production and logistics management. It plays an essential role in process optimization and in the search for operational efficiency, which is becoming increasingly complex due to fluctuations in demand and other constraints. For this reason, we have proceeded to use a heuristic based on the weighted minimum operating time rule to determine the batch processing sequence while respecting the constraints imposed.

Keywords : Scheduling , Optimization , Production planning, Heuristic , Constraints.
