

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par : Manel SARI et Assia CHERIF TOUIL

Thème

**Développement d'une application VBA
pour l'ordonnancement des produits au
sein de l'entreprise SOPHAL SPA**

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2024, devant le jury composé de :

Mme. SEKKAL Norelhouda	MCB	ESSA. Tlemcen	Présidente
M. MALIKI Fouad	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. HARIR Mounir	Docteur	SOPHAL SPA	Co- Directeur de mémoire
M. SOUIER Mehdi	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme.FANDI Wahiba	MAB	ESSA. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2023 /2024

Résumé

Ce mémoire traite des défis de l'ordonnancement de la production dans l'atelier de l'unité 2 de SOPHAL SPA, une entreprise pharmaceutique algérienne. Les limites des outils existants ont conduit au développement d'une application VBA personnalisée basée sur un algorithme de recuit simulé afin d'optimiser les processus de production. La solution propose un ordonnancement optimal en tenant compte des diverses contraintes, notamment, elle est théoriquement solide et pratiquement applicable, ce qui permet de répondre aux défis spécifiques de l'ordonnancement dans un contexte de production complexe.

Mots clés :

Ordonnancement, Production pharmaceutique, SOPHAL SPA, Application VBA, Recuit simulé, Optimisation des processus, Job shop, Lekin.

Abstract

This dissertation deals with the challenges of production scheduling in the workshop of Unit 2 of SOPHAL SPA, an Algerian pharmaceutical company. The limitations of existing tools led to the development of a customized VBA application based on a simulated annealing algorithm to optimize production processes. The solution proposes optimal scheduling taking into account various constraints, in particular, it is theoretically sound and practically applicable, thus addressing the specific challenges of scheduling in a complex production context.

Key words:

Scheduling, Pharmaceutical production, SOPHAL SPA, VBA application, Simulated annealing, Process optimization, Job shop, Lekin.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تحديات جدولة الإنتاج في ورشة عمل الوحدة 2 في شركة صوفال، وهي شركة أدوية جزائرية. أدت محدودية الأدوات الحالية إلى تطوير تطبيق VBA مخصص يعتمد على خوارزمية محاكاة التلدين لتحسين عمليات الإنتاج. يقترح الحل جدولة مثالية مع مراعاة القيود المختلفة. وعلى وجه الخصوص، فهو سليم نظريًا وقابل للتطبيق عمليًا، وبالتالي يعالج التحديات المحددة للجدولة في سياق الإنتاج المعقد.

الكلمات المفتاحية :

الجدولة، إنتاج المستحضرات الصيدلانية، صوفال، تطبيق VBA، محاكاة التلدين الصلب، تحسين العملية، متجر الوظائف، ليكين.

Dédicaces

À mes chers parents,

Je vous dédie ce mémoire en signe de reconnaissance et de gratitude pour tout ce que vous avez fait pour moi. Votre amour inconditionnel, vos sacrifices et votre soutien indéfectible m'ont permis de surmonter les obstacles et de réaliser mes rêves. Vous avez toujours été là pour moi, m'encourageant à persévérer et à donner le meilleur de moi-même. Merci pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi.

À ma grand-mère Fatiha,

Je te dédie ce mémoire en signe de reconnaissance et d'amour pour tout ce que tu as fait pour moi. Ta sagesse, ta douceur et ton soutien constant ont été des sources d'inspiration et de force tout au long de mon parcours. Tu as toujours été un pilier de ma vie, m'encourageant dans mes études et m'apportant réconfort et conseils. Ton amour inconditionnel et tes sacrifices ont joué un rôle crucial dans mes réussites. Merci pour tes prières, ton soutien moral et ta foi inébranlable en moi. Ce mémoire est dédié à toi, avec tout mon amour et ma gratitude.

À mes chers deux frères Habib et Nadir et à ma sœur Safaa,

Votre soutien constant, vos encouragements et votre compréhension ont été des piliers indispensables tout au long de mon parcours académique. Vous avez été là pour moi dans les moments de doute et de joie, et je vous en suis profondément reconnaissant. Merci d'avoir cru en moi et d'avoir toujours été présents.

À mon cher Anas,

Même à distance, ton soutien et ton aide précieuse ont été inestimables. Ta disponibilité, tes conseils avisés et ton encouragement m'ont permis de surmonter de nombreux défis tout au long de cette aventure académique. Tu as su me motiver dans les moments de doute, me réconforter dans les périodes de stress et célébrer avec moi chaque petite victoire. Merci pour ta présence constante, ton amitié sincère et ta volonté d'aider, pour croire en moi et pour ton amour qui me donne la force de toujours avancer, même de loin.

À mon binôme de ce mémoire, Manel,

Travailler avec toi sur ce projet a été une expérience enrichissante et stimulante. Ta collaboration, ton sérieux et ton engagement ont été indispensables à la réussite de ce mémoire. Merci pour ta patience, ton travail acharné et ton esprit d'équipe. Ce mémoire est autant le tien que le mien.

À mon amie proche et ma sœur d'une autre mère, Sarra,

Ta présence dans ma vie a été une source de force et de réconfort. Ton soutien indéfectible, ton écoute attentive et tes encouragements constants ont été essentiels pour moi. Merci d'être toujours là, de croire en moi et de me motiver à persévérer.

À mes amis : Imane, Meriem, Sameh, feriel, Nassim, salah et khalil

Je vous remercie pour votre amitié sincère, votre soutien indéfectible et les moments de joie que nous avons partagés. Vous avez été là pour moi dans les moments de stress et de difficulté, et votre présence a rendu ce voyage académique beaucoup plus agréable. Merci pour vos encouragements, vos mots de réconfort et vos sourires qui m'ont aidé à traverser les périodes difficiles.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, Votre soutien, vos conseils et votre présence ont été essentiels pour la réalisation de ce mémoire. Je vous remercie du fond du cœur pour votre aide et votre encouragement tout au long de cette aventure.

Assia

Dédicaces

À mes chers parents,

Je vous dédie ce mémoire avec une immense gratitude. Depuis le début de mon parcours académique, vous avez été mes plus grands soutiens. Votre amour, votre patience et votre encouragement inconditionnels m'ont donné la force de surmonter tous les obstacles. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments où je doutais de moi-même. Vos sacrifices et vos efforts pour m'offrir les meilleures opportunités sont la raison pour laquelle j'ai pu arriver jusqu'ici. Je ne pourrais jamais exprimer suffisamment à quel point je vous suis reconnaissant. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes chères sœurs Asma et Rania,

Je vous dédie également ce mémoire avec une profonde affection. Votre présence dans ma vie est une source de joie et de soutien. Vous avez été là pour moi dans les moments difficiles et avez partagé mes réussites. Votre amour, vos encouragements et vos précieux conseils m'ont aidé à rester motivé et à persévérer. Je suis chanceuse de vous avoir dans ma vie.

À mes beaux-frères Sofiane et Yacine,

Un grand merci à vous également. Votre soutien, vos encouragements et votre capacité à me faire rire ont été d'une grande aide tout au long de ce parcours. Votre détermination à réussir et à travailler a été une source de motivation pour moi. Merci de faire partie de la famille.

À mon binôme Assia,

Je te dédie ce mémoire avec une profonde gratitude. Tout au long de notre travail ensemble, tu as été une partenaire précieuse, toujours là pour moi et d'un soutien incroyable. Ta patience et ta détermination sans faille ont été des qualités admirables qui ont beaucoup contribué à notre réussite commune. Travailler avec toi a été une expérience enrichissante et agréable, où nous avons surmonté chaque défi grâce à notre engagement mutuel. Merci d'avoir été un binôme exceptionnel.

À mes amis,

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien précieux de personnes exceptionnelles qui ont illuminé mon chemin par leur présence et leur soutien indéfectible. À Nihel, Asma, Lynda, Rifel, Mehdi, les meilleurs moments de ma vie d'étudiante se sont déroulés avec vous. Je souhaite exprimer ma reconnaissance pour votre amitié indéfectible. À Niama, tu as été mon pilier, ma voix de la raison quand les défis semblaient insurmontables. Ta sagesse et ton optimisme ont éclairé

chaque étape de ce parcours académique. À vous, mes chers Kamar et Ryzlene, votre soutien a été d'une aide précieuse pour accomplir ce travail. Vous avez été une source d'inspiration pour moi, merci pour vos précieux conseils. Sans oublier Hadjer, Ferial, Ghizlène, Safia, Nadir, votre soutien, votre amitié et vos encouragements m'ont permis de traverser les hauts et les bas de ce parcours.

À tous ceux qui ont croisé mon chemin et ont enrichi cette expérience académique de leur soutien et de leur amitié, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Je vous dédie cette réalisation et je m'engage à honorer votre soutien en continuant à persévérer, vos encouragements constants, vos sacrifices et votre amour ont été les piliers sur lesquelles j'ai construit ce mémoire.

Manel

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Ce projet n'aurait pas été possible sans le soutien, les conseils et l'encouragement de nombreux individus. Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude à Dieu, pour nous avoir donné la force, la patience et la détermination nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Sans Sa guidance et Ses bénédictions, ce projet n'aurait pas été possible.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos parents respectifs pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant. Votre encouragement et votre foi en nous ont été des sources de motivation et de force inestimables.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire académique, M. MALIKI Foad, pour son soutien inestimable, ses conseils éclairés et son dévouement tout au long de ce projet. Votre expertise et votre encouragement constant ont été des sources d'inspiration qui nous ont permis de surmonter les défis et de progresser avec confiance. Merci pour votre patience, votre disponibilité et pour avoir cru en nous.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement notre co-directeur de mémoire, M. HARIR Mounir, pour nous avoir accueillis au sein de votre équipe et pour nous avoir guidés avec une grande bienveillance. Votre expertise professionnelle, vos précieux conseils et votre soutien nous ont permis de nous développer tant sur le plan professionnel que personnel. Merci de nous avoir offert cette opportunité unique et de nous avoir accompagnés tout au long de cette expérience enrichissante.

Nous tenons à exprimer chaleureusement notre profonde gratitude le leadership de l'unité, Mme MOULELKAF Chaimaa, vous avez non seulement partagé vos connaissances approfondies et vos expériences pratiques, mais vous avez également créé un environnement propice à l'apprentissage et à l'innovation. Grâce à vos conseils avisés et à votre encadrement, nous avons pu acquérir une compréhension approfondie des processus de production et développer des solutions concrètes aux défis rencontrés.

Votre expertise, votre patience et votre disponibilité ont été essentielles pour la réalisation de ce travail.

Merci pour votre collaboration afin de contribuer à l'optimisation des processus de production au sein de SOPHAL.

Nous adressons aussi nos remerciements sincères à toute l'équipe de Sophal, et en particulier à l'équipe SC et PROD. Votre collaboration, votre soutien et vos conseils ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire. Merci pour votre accueil chaleureux, votre disponibilité et votre aide précieuse tout au long de notre stage.

Travailler avec vous a été une expérience enrichissante et inspirante.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers notre jury de soutenance. Merci à Mme SEKKAL Norelhouda, présidente du jury, pour votre bienveillance et vos précieuses observations. Merci à notre examinateur M. SOUIER Mehdi, pour votre attention et vos conseils avisés. Votre expertise et vos retours ont grandement contribué à l'amélioration de ce mémoire. Enfin, Merci également à notre

examinatrice Mme FANDI Wahiba, pour votre temps et vos remarques constructives. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre famille pour leur amour, leur soutien constant et leurs encouragements indéfectibles. Votre présence et votre foi en nous ont été des sources de motivation et de force inestimables.

Nos remerciements vont également à tous nos amis pour leur amitié sincère et leur soutien moral tout au long de ce parcours. Vous avez été une source de réconfort et de joie dans les moments difficiles.

À vous tous, nous sommes profondément reconnaissants pour l'apprentissage et la croissance que nous avons pu réaliser grâce à votre encadrement et votre soutien. Ce mémoire est en grande partie le fruit de vos efforts et de votre engagement à nos côtés.

*Avec toute notre gratitude,
Manel & Assia*

Introduction générale

Dans le contexte actuel de compétitivité accrue et d'évolution rapide des entreprises, l'industrie pharmaceutique occupe une place centrale en raison de son rôle crucial dans la santé publique et l'économie mondiale. Les entreprises pharmaceutiques doivent continuellement innover et améliorer leurs processus de production pour répondre aux exigences de qualité, de sécurité et de réglementation, tout en restant compétitives sur le marché global.

L'industrie pharmaceutique en Algérie connaît une croissance significative, stimulée par une demande croissante de médicaments et des politiques favorables à l'investissement. Cette expansion s'accompagne de défis importants, notamment en termes d'optimisation des processus de production pour garantir l'efficacité et la compétitivité sur le marché. Cette situation requiert une adaptation constante des méthodes de gestion et d'organisation de la production, où l'ordonnancement joue un rôle crucial.

L'ordonnancement, en tant que fonction clé de la gestion de la production, vise à organiser l'utilisation des ressources disponibles de manière efficace pour répondre aux demandes des clients et aux exigences du plan de production. En Algérie, l'ordonnancement des produits pharmaceutiques présente des défis spécifiques. Chaque produit nécessite une séquence différente de machines et de temps de traitement, ce qui rend l'ordonnancement varié et complexe.

SOPHAL, une entreprise pharmaceutique algérienne spécialisée dans la production de médicaments génériques, est consciente de ces enjeux et de l'importance de l'optimisation de la production. Actuellement, SOPHAL rencontre des difficultés dans l'ordonnancement de sa production et souhaite optimiser l'ordonnancement pour remédier aux insuffisances de leur système actuel, de ce fait l'entreprise souhaite mettre en place une application d'ordonnancement de ses processus de production. Afin de remédier aux insuffisances de leur système actuel l'équipe de la supply chain nous a confié le développement d'une application pour optimiser l'ordonnancement des produits.

La question centrale étant :

“ Comment développer une application pour l'ordonnancement des produits au sein de l'entreprise SOPHAL ? ”

Ce mémoire vise à répondre à cette question et nous avons organisé notre travail en trois chapitres.

- Chapitre 1 : État des lieux

Ce chapitre offre un aperçu de l'industrie pharmaceutique, en couvrant à la fois le contexte international et la situation en Algérie. Il inclut une analyse détaillée du marché pharmaceutique. Une attention particulière est accordée à l'entreprise SOPHAL, en retraçant son histoire, en décrivant ses activités et son catalogue de produits. De plus, il présente en détail l'unité 2, spécialisée dans la fabrication de comprimés, gélules et PSB (Préparations Suspension Buvable).

- Chapitre 2 : État de l'art

Ce chapitre explore les théories et les méthodes d'ordonnancement applicables à un atelier de type job shop. Il aborde les définitions essentielles, les éléments constitutifs d'un problème d'ordonnan-

cement, les classifications, les différents types d'ordonnancement, la complexité des problèmes et les méthodes de résolution. Une attention particulière est accordée au problème de type job shop et à l'algorithme du recuit simulé.

- Chapitre 3 : Mise en place des solutions et des résultats

Ce chapitre détaille la solution développée, incluant l'implémentation de l'application VBA. Il est structuré en deux parties : la première présente les solutions sans tenir compte des temps de changement, avec une comparaison au logiciel LEKIN, tandis que la seconde intègre ces temps ainsi que les quantités de produits, permettant une planification plus réaliste et optimisée.

En résumé, ce mémoire présente une approche novatrice et efficace pour résoudre les défis complexes de l'ordonnancement dans les ateliers de production pharmaceutiques, en utilisant une application VBA.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale	2
1 L'industrie pharmaceutique-SOPHAL	3
1.1 Introduction	3
1.2 L'industrie pharmaceutique	3
1.2.1 Présentation de l'industrie pharmaceutique internationale	3
1.2.2 Présentation de l'industrie pharmaceutique en Algérie	4
1.3 Le marché pharmaceutique	5
1.3.1 Le marché pharmaceutique mondiale	5
1.3.2 Le marché pharmaceutique Algérien	7
1.4 Présentation de l'entreprise	8
1.4.1 Présentation générale de SOPHAL	8
1.4.2 Histoire de l'entreprise SOPHAL	8
1.4.3 Activité et catalogue de produits	9
1.5 Description Détaillée de l'Unité 2 de Production de SOPHAL	11
1.6 Conclusion	13
2 Généralités sur l'ordonnancement	14
2.1 Introduction	14
2.2 Définitions	14
2.3 Les éléments d'un problème d'ordonnancement	15
2.3.1 Les tâches	15
2.3.2 Les ressources	15
2.3.3 Les contraintes	16
2.3.4 Les objectifs	17
2.4 Classification des problèmes d'ordonnancement	17
2.4.1 Le champ α	17
2.4.2 Le champ β	19
2.4.3 Le champ γ	20
2.5 Types d'ordonnancement	20
2.6 Complexité des problèmes d'ordonnancement	21
2.7 Les méthodes de résolution d'un problème d'ordonnancement	21
2.7.1 Les méthodes exactes	22
2.7.2 Les méthodes approchées	23
2.8 Problème de type JOB SHOP	24

2.9	Algorithme du RECUIT SIMULE	25
2.10	Conclusion	28
3	Mise en place des solutions et des résultats	29
3.1	Introduction	29
3.2	Problématique	29
3.3	L'outil VBA	30
3.4	Description de l'application VBA	31
3.4.1	Contexte et objectifs de l'application	31
3.4.2	Fonctionnalités principales	31
3.4.3	Méthodologie de développement	31
3.4.4	Interface utilisateur et processus d'utilisation	32
3.4.5	Fonctionnement du programme	35
3.5	Partie A	38
3.5.1	Définition du logiciel LEKIN	38
3.5.2	Simulation de l'unité 2 sur le logiciel LEKIN	39
3.5.3	Application VBA sans temps de changements	44
3.5.4	Comparaison des résultats	45
3.6	Partie B	46
3.6.1	Données considérées	46
3.6.2	Améliorations apporter à l'interface utilisateur	46
3.6.3	Analyse des résultats	50
3.6.4	Conclusion	56
	Conclusion générale	57
	Glossaire	
	Bibliographie	

Table des figures

1.1	Le marché pharmaceutique mondial par zone géographique en 2021 [4]	5
1.2	Classement des entreprises selon les ventes mondiales de médicaments d'ordonnance et de dépense en R&D en 2021[5]	6
1.3	Demande du marché pharmaceutique en Afrique par pays en 2021 [10]	7
1.4	Histoire de SOPHAL SPA	8
1.5	Schéma du Processus de Production pour l'unité 2	12
2.1	Caractéristique d'une tâche [22]	15
2.2	Typologie par machine [32]	18
2.3	Typologie des problèmes d'ordonnancement [32]	19
2.4	Relations entre différent type d'ordonnancement [2]	20
2.5	Atelier de type Job Shop [3]	25
2.6	Algorithme relatif au fonctionnement général du recuit simulé [11]	27
3.1	Fichier excel avec les différents feuilles	33
3.2	Interface principale de l'application	33
3.3	Création du bouton "Choix de produits"	34
3.4	Formulaire utilisateur "Affichage des produits"	34
3.5	Affichage des machines du produit	34
3.6	Formulaire utilisateur "Affichage del'ordonnancement"	35
3.7	Code d'une partie de la fonction makespan	36
3.8	Code d'une partie de l'algorithme du recuit simulé	37
3.9	Temps de Traitement en minutes	40
3.10	Échelle de Conversion	40
3.11	Temps de Traitement Convertis	40
3.12	Configuration des Machines dans LEKIN	41
3.13	Insertion des Jobs et Routage	42
3.14	Analyse des résultats sur LEKIN	43
3.15	Feuille résultats	44
3.16	Le plan de production prévisionnel par mois	46
3.17	formulaire utilisateur "Affichage des produits"	47
3.18	La liste des mois	47
3.19	Les quantités mensuelles à produire	48
3.20	Message d'erreur	48
3.21	Le formulaire utilisateur "affichage de l'ordonnancement"	49
3.22	feuille "résultats".	50
3.23	Séquence obtenue.	51
3.24	Temps de changement par machine.	51
3.25	le nombre de lots annuels et mensuels.	52
3.26	Temps de changement après chaque 10 lots.	53
3.27	La feuille "resultsDate".	54

3.28	La coloration des shifts.	54
3.29	La date de référence en fonction du mois sélectionné.	55
3.30	Les dates de début, de fin et Cmax convertis en date.	55
3.31	Nombre de shift	56

Liste des tableaux

3.1	Données de nettoyage	32
3.2	Codage de solution	36

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ENPP	Entreprise Nationale de Production Pharmaceutique
EDD	Earliest Due Date (Date de fin la plus proche)
FIFO	First In First Out (Premier arrivé premier servis)
IBM	International Business Machines
LPT	Longest Processing Time (Délai de traitement le plus long)
MS	Micro Soft
OEP	Optimisation par Essaim Particulaire
PCA	Pharmacie Centrale Algérienne
PCH	Pharmacie Centrale des Hôpitaux
PNB	Produit National Brut
PSB	Préparations en Suspension Buvable
R&D	Recherche et Développement
RS	Recuit simulé
SPA	Société Par Action
SPT	Shortest Processing Time (Shortest Processing Time)
TS	Tabu Search (Recherche Tabou)
VB	Visual Basic
VBA	Visual Basic pour Applications

Introduction générale

Dans le contexte actuel de compétitivité accrue et d'évolution rapide des entreprises, l'industrie pharmaceutique occupe une place centrale en raison de son rôle crucial dans la santé publique et l'économie mondiale. Les entreprises pharmaceutiques doivent continuellement innover et améliorer leurs processus de production pour répondre aux exigences de qualité, de sécurité et de réglementation, tout en restant compétitives sur le marché global.

L'industrie pharmaceutique en Algérie connaît une croissance significative, stimulée par une demande croissante de médicaments et des politiques favorables à l'investissement. Cette expansion s'accompagne de défis importants, notamment en termes d'optimisation des processus de production pour garantir l'efficacité et la compétitivité sur le marché. Cette situation requiert une adaptation constante des méthodes de gestion et d'organisation de la production, où l'ordonnancement joue un rôle crucial.

L'ordonnancement, en tant que fonction clé de la gestion de la production, vise à organiser l'utilisation des ressources disponibles de manière efficace pour répondre aux demandes des clients et aux exigences du plan de production. En Algérie, l'ordonnancement des produits pharmaceutiques présente des défis spécifiques. Chaque produit nécessite une séquence différente de machines et de temps de traitement, ce qui rend l'ordonnancement varié et complexe.

SOPHAL, une entreprise pharmaceutique algérienne spécialisée dans la production de médicaments génériques, est consciente de ces enjeux et de l'importance de l'optimisation de la production. Actuellement, SOPHAL rencontre des difficultés dans l'ordonnancement de sa production et souhaite optimiser l'ordonnancement pour remédier aux insuffisances de leur système actuel, de ce fait l'entreprise souhaite mettre en place une application d'ordonnancement de ses processus de production. Afin de remédier aux insuffisances de leur système actuel l'équipe de la supply chain nous a confié le développement d'une application pour optimiser l'ordonnancement des produits.

La question centrale étant :

“ Comment développer une application pour l'ordonnancement des produits au sein de l'entreprise SOPHAL ? ”

Ce mémoire vise à répondre à cette question et nous avons organisé notre travail en trois chapitres.

- Chapitre 1 : État des lieux

Ce chapitre offre un aperçu de l'industrie pharmaceutique, en couvrant à la fois le contexte international et la situation en Algérie. Il inclut une analyse détaillée du marché pharmaceutique. Une attention particulière est accordée à l'entreprise SOPHAL, en retraçant son histoire, en décrivant ses activités et son catalogue de produits. De plus, il présente en détail l'unité 2, spécialisée dans la fabrication de comprimés, gélules et PSB (Préparations Suspension Buvable).

- Chapitre 2 : État de l'art

Ce chapitre explore les théories et les méthodes d'ordonnancement applicables à un atelier de type job shop. Il aborde les définitions essentielles, les éléments constitutifs d'un problème d'ordonnan-

cement, les classifications, les différents types d'ordonnancement, la complexité des problèmes et les méthodes de résolution. Une attention particulière est accordée au problème de type job shop et à l'algorithme du recuit simulé.

- Chapitre 3 : Mise en place des solutions et des résultats

Ce chapitre détaille la solution développée, incluant l'implémentation de l'application VBA. Il est structuré en deux parties : la première présente les solutions sans tenir compte des temps de changement, avec une comparaison au logiciel LEKIN, tandis que la seconde intègre ces temps ainsi que les quantités de produits, permettant une planification plus réaliste et optimisée.

En résumé, ce mémoire présente une approche novatrice et efficace pour résoudre les défis complexes de l'ordonnancement dans les ateliers de production pharmaceutiques, en utilisant une application VBA.

Chapitre 1

L'industrie pharmaceutique-SOPHAL

1.1 Introduction

L'industrie pharmaceutique joue un rôle crucial dans le maintien et l'amélioration de la santé publique à l'échelle mondiale. En tant que secteur dynamique et innovant, elle est marquée par des avancées technologiques, des exigences réglementaires strictes et une concurrence intense.

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble de l'industrie pharmaceutique, tant à l'échelle internationale qu'algérienne, en soulignant les tendances du marché et les particularités de chaque contexte. En outre, dans ce chapitre, nous verrons une présentation détaillée de l'entreprise SOPHAL, où on a effectué notre stage, mettant en lumière son histoire, ses activités, et son catalogue de produits. Cette analyse préliminaire est essentielle pour comprendre le cadre général dans lequel s'inscrit notre mémoire, en jetant les bases pour les chapitres suivants qui aborderont des aspects plus techniques et spécifiques.

1.2 L'industrie pharmaceutique

L'industrie pharmaceutique est un pilier fondamental de la santé publique, assurant la découverte, le développement, la fabrication et la commercialisation de médicaments. Elle couvre diverses activités, de la recherche à la distribution, nécessitant la collaboration de nombreux acteurs. En raison de son importance pour le bien-être public, elle est soumise à des réglementations strictes et des normes de qualité élevées. Ce secteur est également marqué par une innovation constante pour répondre aux besoins de santé évolutifs.

Dans ce qui suit nous allons aborder l'industrie pharmaceutique internationale et l'industrie pharmaceutique Algérienne

1.2.1 Présentation de l'industrie pharmaceutique internationale

L'industrie pharmaceutique constitue un élément essentiel des systèmes de santé à l'échelle mondiale. Elle englobe une multitude d'entreprises et de services, tant publics que privés, dédiés à la découverte, au développement, à la fabrication et à la commercialisation de médicaments pour la santé humaine et animale.

L'industrie pharmaceutique est soumise à l'influence de nombreux facteurs dynamiques, qu'ils soient scientifiques, sociaux ou économiques. La présence de multiples groupes pharmaceutiques sur les marchés nationaux et internationaux implique que leurs activités et leurs produits soient régis par les lois, les réglementations et les politiques applicables à la mise au point, à la fabrication, à l'autorisation, au contrôle de la qualité et à la commercialisation des médicaments dans de nombreux pays [29].

La R&D, associée aux connaissances toxicologiques et à l'expérience clinique, constitue le moteur principal de l'industrie pharmaceutique. On observe des différences significatives entre les grands groupes qui mènent des activités diversifiées de R&D, de fabrication, de contrôle de la qualité et de commercialisation, et les entreprises plus modestes qui se concentrent sur un aspect particulier. La plupart des sociétés pharmaceutiques multinationales opèrent dans tous ces domaines, mais elles peuvent également se spécialiser dans un secteur spécifique en fonction des données du marché local. De plus, le commerce national et international, ainsi que les politiques et les pratiques fiscales et financières, influencent le fonctionnement de l'industrie pharmaceutique au sein d'un pays.

L'industrie pharmaceutique internationale se distingue par sa structure fragmentée et sa culture mondialisée. Aucun acteur ne détient plus de 10% du marché mondial, ce qui rend le secteur hautement concurrentiel et diversifié. Cette mondialisation se traduit par des projets de développement de médicaments menés sur plusieurs territoires simultanément, parfois en collaboration avec plusieurs compagnies [18].

L'industrie pharmaceutique internationale est confrontée à de nombreux défis parmi eux :

- Manque d'innovation, l'industrie pharmaceutique souffre d'un manque d'innovation depuis 1999, avec peu de nouveaux médicaments réellement révolutionnaires.
- La concurrence, de plus en plus importante, des médicaments génériques, favorisée par les politiques de réduction des coûts de santé, réalisées dans les différents pays développés
- Autorités de santé plus vigilantes ce qui ralentit les autorisations de mise sur le marché.
- Montée de la biotechnologie : La biotechnologie devient un acteur majeur dans la découverte de nouveaux médicaments, mais sa culture diffère de celle de l'industrie pharmaceutique traditionnelle [9].

Malgré les nombreux défis auxquels elle est confrontée, l'industrie pharmaceutique dispose de nombreux atouts pour les relever. L'avenir de l'industrie pharmaceutique dépendra de sa capacité à s'adapter à l'évolution constante des besoins de santé, à collaborer avec les autres acteurs de la santé et à innover pour développer de nouveaux médicaments et de nouvelles technologies.

1.2.2 Présentation de l'industrie pharmaceutique en Algérie

L'industrie pharmaceutique algérienne a connu une histoire mouvementée, marquée par des périodes de croissance et de stagnation. Alors que les premiers médicaments fabriqués en Algérie provenaient du Service de santé militaire, la majorité des médicaments étaient importés de la Métropole. Après la Seconde Guerre mondiale, de nombreux laboratoires ont créé des filiales commerciales en Algérie, mais sans aucune fabrication uniquement de la prospection et de la distribution. La production industrielle n'a commencé qu'à partir de la fin des années 1950.

Après l'indépendance, l'État algérien a nationalisé l'importation, la distribution et la production des médicaments [15].

Dans les années 1980, le secteur public industriel pharmaceutique en Algérie a connu une profonde restructuration visant à moderniser et dynamiser ce secteur crucial. L'objectif principal était de séparer les fonctions de production et de commercialisation, ainsi que de régionaliser les activités commerciales.

La restructuration a impliqué la réorganisation de la Pharmacie Centrale Algérienne (PCA). Cette entité a été scindée en trois institutions régionales, connues sous le nom des "trois PHARMS", et en une entreprise nationale de production pharmaceutique, l'ENPP. Cette dernière a été transformée en entreprise publique économique en 1989, devenant le groupe SAIDAL. Parallèlement, la Pharmacie Centrale des Hôpitaux (PCH) a été créée. Cette structure est devenue l'unique responsable de l'approvisionnement des établissements de santé publique en médicaments [33].

En 1990, la libéralisation du secteur pharmaceutique a été rendue possible par l'adoption de lois visant à favoriser l'investissement privé, notamment dans le domaine de la santé et de la production pharmaceutique. Cette stratégie a permis une augmentation de la production locale de médicaments,

en particulier de génériques pour atteindre une couverture médicamenteuse de 80% à court terme, et une réduction de la dépendance aux importations [25].

Les dépenses de santé en Algérie ont également pris une part de plus en plus importante dans le produit national brut (PNB). En 2009, la facture des médicaments était estimée à 3 milliards de dollars. Ce contexte a permis aux entreprises publiques algériennes, telles que le groupe SAIDAL, de développer leurs capacités stratégiques. Face à la rareté des ressources, ces entreprises ont dû optimiser leur utilisation et adopter une réflexion stratégique plus poussée [16].

Les lois et réglementations qui ont été adoptées pour encourager la production nationale et limiter les importations ont été renforcées en 2018 avec une nouvelle loi sanitaire qui ont porté leurs fruits, avec plus de 53% de la demande en médicaments couverte par la production locale en 2020.

Malgré les progrès réalisés, l'industrie pharmaceutique algérienne est encore confrontée à plusieurs défis. L'un des principaux défis est la nécessité de renforcer la production locale afin de réduire la dépendance aux importations. Il est également important de développer la recherche et le développement (R&D) dans le secteur pharmaceutique afin de créer de nouveaux médicaments et de technologies.

L'avenir de l'industrie pharmaceutique algérienne est prometteur. Le pays a le potentiel de devenir un leader dans le domaine de la santé en relevant les défis actuels et en continuant à investir dans la production locale, la R&D et l'innovation.

1.3 Le marché pharmaceutique

Le marché pharmaceutique est crucial pour l'économie mondiale et la santé publique, englobant la production, la distribution et la commercialisation de médicaments. Ce secteur est dynamisé par une demande croissante et une innovation constante. Divers acteurs, des grands groupes aux entreprises émergentes, contribuent à sa compétitivité, tandis que les politiques gouvernementales et les réglementations internationales influencent sa structure et son expansion, par la suite nous allons présenter le marché pharmaceutique mondiale et le marché pharmaceutique Algérien.

1.3.1 Le marché pharmaceutique mondiale

Le marché pharmaceutique mondial est un secteur en pleine expansion, représentant un chiffre d'affaires colossal de 1 482 milliards de dollars de chiffre d'affaires en 2022 et retrouve ainsi sa dynamique d'avant la crise de la Covid-19, avec une croissance de 2,2% par rapport à 2021. Cette progression fulgurante témoigne de l'importance croissante de ce secteur dans l'économie mondiale. L'Amérique du Nord s'est hissée au sommet du podium, détenant une part de marché de 47,2%, tandis que l'Europe et la Chine ont enregistré des parts respectives de 25,5% et 9,7%. Les autres pays de la zone Asie-Pacifique ont quant à eux contribué à hauteur de 17,6% [6].

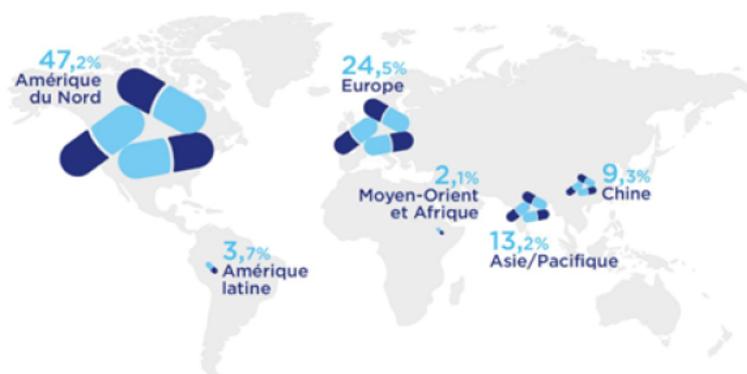


FIGURE 1.1 – Le marché pharmaceutique mondiale par zone géographique en 2021 [4]

IQVIA prévoit une forte croissance du marché pharmaceutique d'ici 2027, en particulier dans les pays émergents. Cette croissance sera tirée par deux facteurs :

- **Augmentation du nombre de médicaments vendus (croissance en volume)** : Les pays émergents ont un besoin croissant de médicaments pour leur population en pleine croissance.
- **Augmentation du prix moyen des médicaments vendus (croissance en valeur)** : Les pays émergents ont un accès accru à des médicaments plus coûteux, notamment les nouveaux traitements innovants.

Au cœur de cette industrie se trouvent des entreprises pharmaceutiques internationales qui consacrent leurs ressources à la recherche, au développement et à la commercialisation de produits pharmaceutiques de pointe.

Les meilleures entreprises pharmaceutiques se distinguent par leurs ventes mondiales de médicaments d'ordonnance et leurs dépenses en R&D, ainsi que par leur rentabilité. Parmi elles, on trouve :

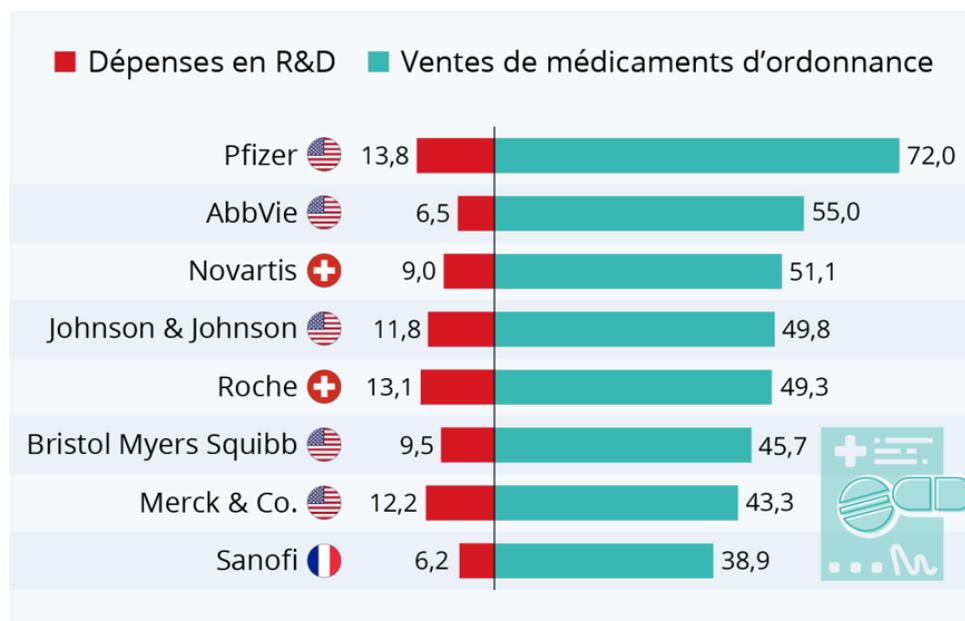


FIGURE 1.2 – Classement des entreprises selon les ventes mondiales de médicaments d'ordonnance et de dépense en R&D en 2021[5]

1.3.2 Le marché pharmaceutique Algérien

Le marché pharmaceutique algérien est en pleine croissance ces dernières années, il représente le troisième marché en Afrique.

Le marché pharmaceutique AFRICAÏN est très concentré autour des 10 premiers pays, représentant environ 75% de la taille totale du marché, l'Algérie, l'Afrique du Sud, l'Égypte, le Nigéria et le Maroc représentant environ 60% des ventes. Les marchés majeurs continueront de stimuler la croissance du marché attendue à 5% par an de 2020 à 2024 l'Algérie contribuera avec +6 [10].

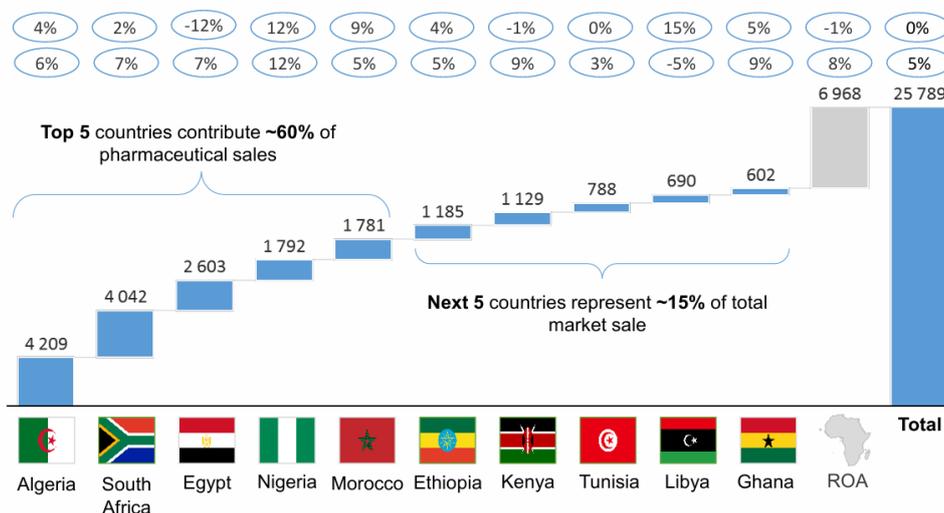


FIGURE 1.3 – Demande du marché pharmaceutique en Afrique par pays en 2021 [10]

Depuis des décennies, l'économie Algérienne est basée, principalement, sur la rente tirée des hydrocarbures (le pétrole et le gaz). Ils représentent 96% des exportations du pays.

Mais pour assurer un développement économique constant, et dans le but de réduire les factures d'importation, le gouvernement a adopté une politique basée sur la promotion de l'industrie nationale. Les plus grands efforts effectués par le gouvernement Algérien ont été constatés dans l'industrie pharmaceutique [13].

La production nationale couvrait 45% de la consommation du pays en 2015. En 2023, l'Algérie compte près de 200 sites locaux de production lui permettant d'assurer 70 à 75% des besoins du pays ces sites assurent toutes les étapes de fabrication du produit fini. L'objectif est une couverture de 80% des besoins du marché national d'ici la fin de l'année 2024.

Jusqu'à la crise sanitaire de 2020, le marché pharmaceutique algérien était en croissance depuis 15 ans puisque cette croissance n'a jamais été inférieure à 8% chaque année. Si le chiffre d'affaires évolue de 2,2 milliards de dollars américains en 2020 à 2,1 milliards en 2021, il connaît une croissance de 12,8% en 2022 par rapport à l'année précédente pour atteindre 2,4 milliards.

Cette croissance s'explique d'une part par la dynamique démographique du pays avec une population de 44 millions d'habitants, c'est le pays le plus peuplé du Maghreb.

D'autre part, l'augmentation du niveau de vie a entraîné un essor des maladies chroniques dues au mode de vie (diabète, maladies cardiovasculaires) et là aussi un accroissement de la demande de soins.

Enfin, l'Algérie participe activement à la création de l'Agence Africaine du Médicament et a déposé l'instrument de ratification en juin 2021. L'objectif de cette Agence Africaine est de renforcer la capacité des États membres à réglementer les produits de santé, en vue d'améliorer l'accès sur le continent africain à des produits médicaux dont la qualité, la sécurité et l'efficacité sont garanties [26].

1.4 Présentation de l'entreprise

1.4.1 Présentation générale de SOPHAL

Depuis sa création en 1994, SOPHAL s'est imposé comme un acteur majeur de l'industrie pharmaceutique algérienne. Animé par une mission noble d'améliorer la santé publique, le laboratoire s'est spécialisé dans la production, le développement et la commercialisation de médicaments génériques de haute qualité.

SOPHAL se distingue par son engagement indéfectible envers la recherche et le développement. L'entreprise investit dans l'exploration de nouvelles technologies et l'optimisation de ses processus de production. Cette recherche constante de progrès lui permet de proposer des médicaments génériques sûrs, efficaces et accessibles à tous.

Le laboratoire SOPHAL est équipé d'infrastructures modernes et de machines de production conformes aux Bonnes Pratiques de Fabrication et aux normes internationales garantissant ainsi la qualité irréprochable de ses produits. Deux sites de production constituent l'infrastructure de SOPHAL, le premier site abrite les unités 1 à 5 répondant aux besoins spécifiques en formes sèches et injectables, tandis que le second site est consacré à l'unité 6, spécialisé en forme injectable.

Le portefeuille de SOPHAL s'étend à 74 produits, couvrant onze aires thérapeutiques majeures. L'entreprise répond ainsi aux besoins de santé d'une large population en Algérie, en s'adaptant aux pathologies les plus répandues.

SOPHAL aspire à étendre son influence à l'échelle internationale. L'entreprise projette d'exporter ses produits

En conclusion, SOPHAL incarne un modèle de réussite dans l'industrie pharmaceutique algérienne. Son engagement indéfectible envers la qualité, l'innovation et l'accessibilité des médicaments en fait un acteur incontournable du paysage sanitaire national et un véritable atout pour le développement du pays.

1.4.2 Histoire de l'entreprise SOPHAL

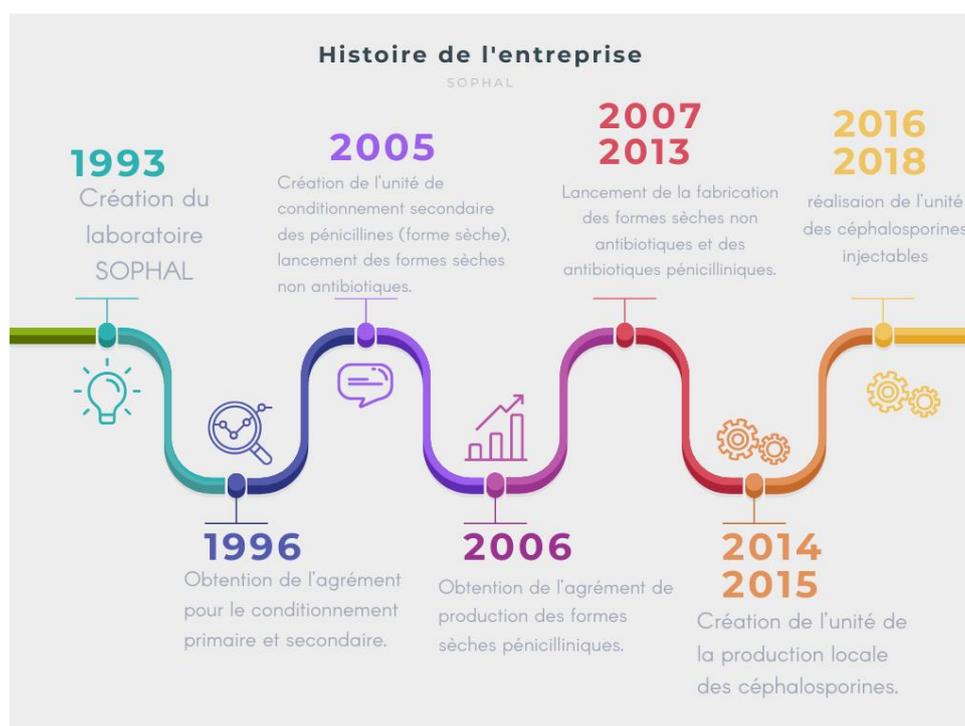


FIGURE 1.4 – Histoire de SOPHAL SPA

1.4.3 Activité et catalogue de produits

SOPHAL se consacre à la fabrication de médicaments génériques de haute qualité pour les hôpitaux et les pharmacies. Ces médicaments sont des copies conformes, en termes d'efficacité et de sécurité des médicaments de marque, mais commercialisés sous leur dénomination commune internationale (DCI) ou un nouveau nom commercial.

L'entreprise s'engage à fournir des solutions thérapeutiques dans plusieurs domaines clés :

- **Système cérébral et nerveux** : SOPHAL propose une gamme de médicaments pour le traitement de maladies neurodégénératives, et d'autres affections neurologiques.
- **Anesthésie à usage hospitalier** : L'entreprise offre des solutions anesthésiques pour différents types d'interventions chirurgicales, garantissant un confort et une sécurité optimale aux patients.
- **Préparations immunologiques** : SOPHAL s'investit dans la production de médicaments qui stimulent ou modulent le système immunitaire pour lutter contre diverses maladies.
- **Autres domaines** : L'entreprise fabrique également des sulfamides, des alcaloïdes et des antibiotiques, contribuant ainsi à la prise en charge d'infections bactériennes et d'autres pathologies.

Voici le tableau résumant la liste de médicaments de SPA :

A.I.N.S (les antiinflammatoires non stéroïdiens)	IBUPROFALE 200mg /400mg / 600mg DICLOROFALE 50mg ASPIGALE 500mg FLURBIPROFAL 100 mg CELEXAL 200mg
ANTI-RHIME	TRIPARACETAL Rhume 500mg PARADIPAL 500mg RHINEDAL 200mg / 30mg
GASTROLOGIE	LOPERIDAL 2mg RANITIDAL 150mg
NEUROLOGIE	SULPIDAL 50mg
UROLOGIE	CIALFAL 5mg et 20mg SILDIFAL 50mg
CORTICOIDES	MEPRENAL 20mg/2ml MEPRENAL 40mg/2ml PREDNAL 20mg
ANTALGIQUE	PARACETAL 500mg TRAPAL 325mg/37,5mg
ANTI HISTALINIQUE	FEXONIDAL 120mg
ANTIBIOTIQUE	PENIVAL 1 U.I/1,5 U.I AMPAL 500mg AMOXAL 500mg /1g. 125mg/5ml. 250mg/5ml. 500mg/5ml LEXINAL 500mg / 1g. 125mg/5ml. 250mg/5ml CEDROXAL 1g CEFAZAL 1g OROKAL 200mg. 400mg. 100mg/5ml OMNIFAL 300mg SPIRAMYNAL 1,5 M.U.I / 3 M.U.I CLARITAL 500mg AZITHRAL 500mg COTRIMOXAL 400mg/80mg COTRIMOXAL FORTE 800mg/160mg CIPROFLOXAL 250mg / 500mg NORFLOXAL 400mg
VITAMINES	CALCUME 500mg NOVITAL 250mg B6@250mg

SOPHAL s'affirme comme une force dans l'industrie pharmaceutique algérienne grâce à ses six unités de production modernes. Couvrant une large gamme de médicaments :

- **Ophthalmologie** : 2,5 millions d'unités par mois pour répondre aux besoins en soins oculaires.
- **Antibiotiques Céphalosporines** : 15 millions d'unités par mois pour combattre les infections bactériennes.
- **Formes sèches** : 10 millions d'unités par mois pour une variété de traitements.
- **Céphalosporines stériles injectables** : 2,5 millions d'unités par mois pour une administration précise.
- **Produits injectables stériles** : 2 millions d'unités par mois pour des solutions thérapeutiques diversifiées.
- **Corticoïdes stériles injectables lyophilisés** : 7 millions d'unités par mois pour des traitements spécifiques

1.5 Description Détaillée de l'Unité 2 de Production de SOPHAL

La description suivante est basée sur nos observations et expériences durant notre stage au sein de l'unité 2 de l'entreprise pharmaceutique Sophal, spécialisée dans la production de comprimés, gélules et préparations en suspension buvable (PSB).

L'unité de production des comprimés, gélules et PSB est une installation bien structurée et organisée, conçue pour assurer une production efficace et conforme aux normes de qualité pharmaceutiques strictes. Le processus de production peut être divisé en plusieurs étapes clés, chacune ayant des équipements spécifiques et des procédures distinctes.

Cette unité fonctionne selon le modèle de production de type job shop, où les produits suivent des chemins variés à travers les différentes machines et étapes de fabrication en fonction de leurs spécifications particulières. Cette configuration permet une grande flexibilité dans la gestion des diverses tâches de production, bien que cela rende l'ordonnancement des opérations plus complexe en raison des différentes contraintes de ressources et de temps.

Réception et Pesée des Matières Premières La première étape du processus de production est la réception des matières premières. Les matières premières nécessaires à la fabrication des produits sont livrées par le magasin de l'entreprise à l'unité de production. Les opérateurs réceptionnent ces matières et les transportent dans la salle de pesée. Dans cette salle, les matières premières sont pesées avec précision en fonction des spécifications de la demande de production. Cette pesée est essentielle pour garantir que les quantités utilisées sont exactes et conformes aux recettes de fabrication. Une fois pesées, les matières premières sont placées dans des fûts appropriés pour leur manipulation ultérieure.

Salle de Transit Après la pesée, les fûts contenant les matières premières pesées sont transportés dans la salle de transit. Cette salle sert de zone d'attente pour les matières premières avant qu'elles ne soient acheminées vers la prochaine étape du processus de production. La salle de transit permet de s'assurer que les matières premières sont disponibles et prêtes pour les étapes suivantes sans causer de retards.

Mélange et Granulation Les fûts de matières premières sont ensuite déplacés dans la salle de mélange et de granulation. Cette salle est équipée de mélangeurs et de granulateurs, qui sont utilisés selon les besoins spécifiques du produit à fabriquer. Certaines matières premières passent directement par le mélangeur pour être homogénéisées, tandis que d'autres nécessitent une étape de granulation avant le mélange final. La granulation est un processus important qui permet de former des particules de taille uniforme, améliorant ainsi la consistance et la qualité du produit final.

Fabrication des Comprimés Pour la fabrication des comprimés, les matières premières mélangées sont transportées dans l'une des trois salles de compression. Chaque salle est équipée d'une machine à comprimer spécifique : KILLIAN, HANLIN ou GLYONGLI. Ces machines compressent les matières mélangées pour former des comprimés de forme et de taille uniformes. Après la compression, les comprimés sont transférés dans la salle d'enrobage. L'enrobage des comprimés est une étape cruciale qui peut améliorer la stabilité, la libération du médicament et le goût du produit final.

Fabrication des Gélules Pour la fabrication des gélules, les matières premières mélangées sont dirigées vers la salle de remplissage de gélules. Cette salle est équipée de machines de remplissage qui insèrent les matières mélangées dans des gélules de gélatine ou d'autres matériaux appropriés. Chaque gélule est remplie avec précision pour garantir une dose correcte de médicament.

Fabrication des Suspensions Buvables (PSB) Pour les suspensions buvables (PSB), les matières mélangées sont transportées dans la salle de remplissage PSB. Cette salle est conçue pour remplir des

bouteilles en verre avec la poudre mélangée. Après le remplissage, les bouteilles passent par une série d'étapes de conditionnement. Le conditionnement PSB inclut l'étiquetage des bouteilles, l'emballage dans des étuis individuels, l'ajout de notices explicatives et l'application de vignettes.

Conditionnement Primaire et Secondaire Le conditionnement des produits est divisé en deux étapes : le conditionnement primaire et le conditionnement secondaire.

Pour les comprimés et les gélules, le conditionnement primaire est effectué à l'aide de machines blistereuses situées dans deux salles distinctes. Une blistereuse fonctionne en ligne, où les blisters passent automatiquement par le conditionnement secondaire via un tapis roulant. L'autre blistereuse est hors ligne, nécessitant que les blisters soient collectés dans une corbeille pour un tri manuel avant d'être déplacés vers la machine de conditionnement secondaire.

Le conditionnement secondaire comprend trois machines : une spécialisée pour les PSB et deux autres pour les comprimés et les gélules, l'une fonctionnant en ligne et l'autre hors ligne. Cette étape inclut la mise en étui, l'ajout de la notice et de la vignette, assurant que chaque produit est correctement emballé et étiqueté avant d'être prêt pour la distribution.

Schéma du Processus de Production Pour une compréhension visuelle du processus décrit, un schéma simplifié est présenté ci-dessous :

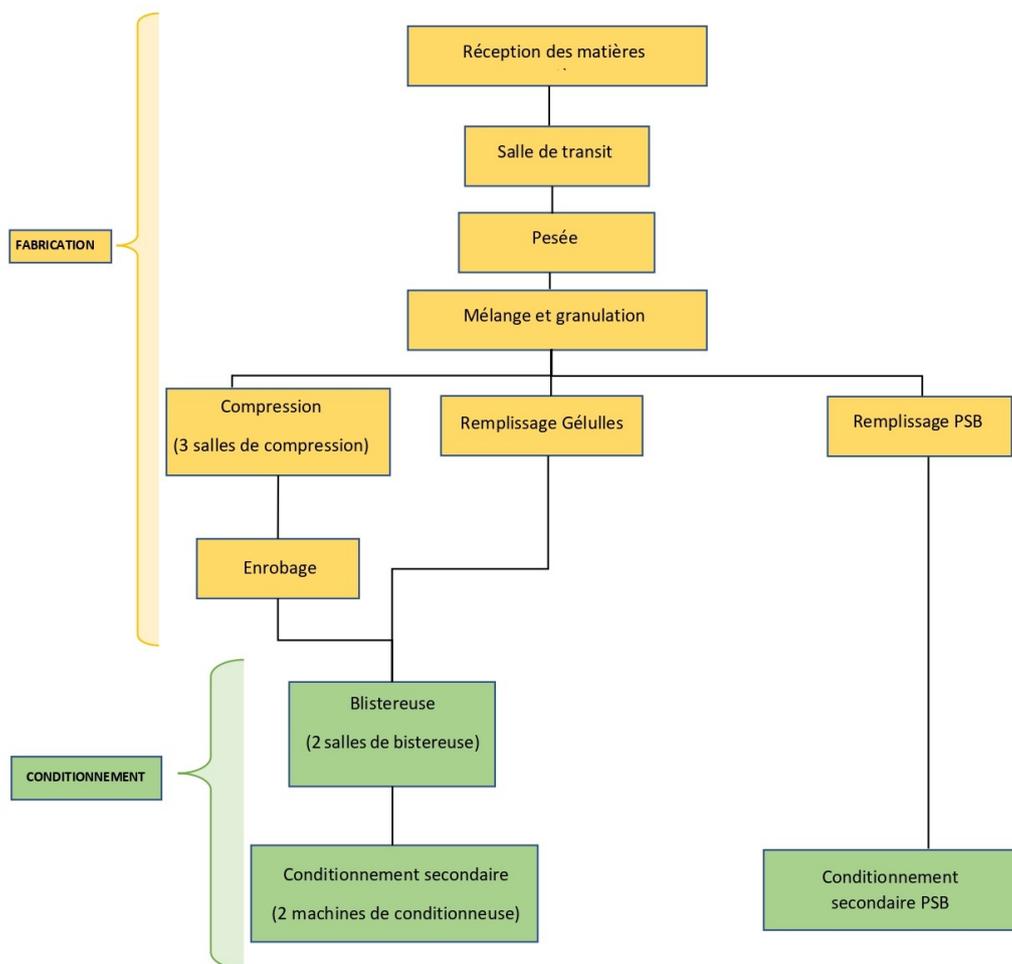


FIGURE 1.5 – Schéma du Processus de Production pour l'unité 2

1.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a fourni un panorama complet de l'industrie pharmaceutique, en soulignant les différences et similitudes entre les marchés international et algérien. L'industrie mondiale se distingue par une forte innovation et des investissements massifs en recherche et développement, tandis que le marché algérien, bien qu'en croissance, fait face à des défis spécifiques tels que la réglementation et les capacités de production.

La présentation de SOPHAL a permis de situer cette entreprise dans le contexte plus large de l'industrie pharmaceutique algérienne, illustrant ses contributions et ses ambitions. Cette base théorique et contextuelle est fondamentale pour appréhender la problématique spécifique abordée dans les chapitres suivants, en particulier celles liées à l'optimisation de la production et à l'ordonnancement des tâches au sein de SOPHAL.

Chapitre 2

Généralités sur l'ordonnancement

2.1 Introduction

L'ordonnancement de la production est crucial pour optimiser l'organisation et la planification des tâches sur les ressources disponibles.

Ce chapitre présente un panorama détaillé de l'ordonnancement, en abordant ses principales définitions, les éléments constitutifs (tâches, ressources, contraintes) et les différentes classifications des problèmes. Nous discutons également de la complexité des problèmes et des méthodes de résolution, en distinguant les méthodes exactes, qui offrent des solutions optimales pour les petits problèmes, et les méthodes approchées, nécessaires pour les problèmes de plus grande envergure. Étant donné que notre problématique principale concerne un atelier de type job shop, une attention particulière est accordée à cette configuration spécifique de plus, nous présentons l'algorithme du recuit simulé la métaheuristique utilisée dans notre étude.

2.2 Définitions

Définition 1 : L'ordonnancement est un processus de prise de décision essentiel utilisé dans de nombreuses industries de services et de production. Il consiste à attribuer les ressources nécessaires aux différentes tâches d'un projet sur une période donnée, dans le but d'optimiser un ou plusieurs objectifs [20].

Définition 2 : L'ordonnancement de la production consiste à organiser dans les temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches [20].

Les problèmes d'ordonnancement apparaissent dans tous les domaines de l'économie : l'informatique (les tâches sont les programmes ; les ressources sont les processeurs, la mémoire. . .), la construction (suivi de projet), l'industrie (activités des ateliers en gestion de production et problèmes de logistique), l'administration (emplois du temps) [12].

Un problème d'ordonnancement présente deux aspects :

- Un aspect statique lié à la génération d'un plan sur la base de données prévisionnelles.
- Un aspect dynamique lié à la prise de décisions en temps réel compte tenu de l'état effectif d'avancement des tâches.

Un bon programme d'ordonnancement doit répondre de manière efficace aux besoins exprimés par l'industrie en augmentant l'efficacité des lignes de production tout en répondant aux objectifs qui peuvent être divers et variés (satisfaction des clients, les délais de livraisons, la minimisation des coûts, des changeovers ou du makespan. . .) [22].

2.3 Les éléments d'un problème d'ordonnancement

Dans un problème d'ordonnancement interviennent des notions fondamentales qui sont : Les tâches, les ressources, les contraintes et les objectifs.

2.3.1 Les tâches

Une tâche T_i se définit comme une activité élémentaire, marquée dans le temps par une date de début S_i (start time) et de fin F_i (Finish time), dont la réalisation est caractérisée par une durée d'exécution P_i (processing time), nécessitant l'utilisation de ressources telle que

$$P_i = F_i - S_i$$

Voici quelques caractéristiques concernant l'exécution d'une tâche :

- La date de début au plus tôt R_i (release date).
- La date de fin au plus tard D_i (due date).
- Un poids W_i (weight) qui représente le facteur de priorité qui dénote l'importance de la tâche i relativement aux autres (comme la profitabilité).

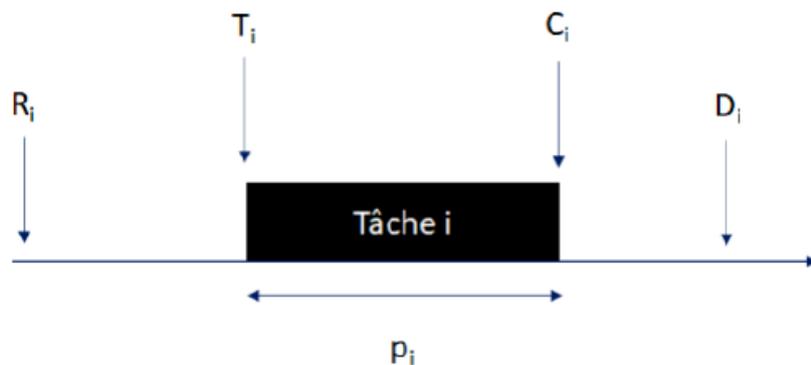


FIGURE 2.1 – Caractéristique d'une tâche [22]

Les tâches sont fréquemment interconnectées par diverses conditions, mais lorsqu'elles ne le sont pas, elles sont dites indépendantes. Une tâche peut être morcelable ou non morcelable :

- Dans le premier cas, on parle de tâche préemptive, ce qui signifie que son exécution peut être interrompue et reprise plus tard, sur une ou plusieurs machines, avec ou sans conservation de l'état précédent.
- Dans le deuxième cas, les tâches doivent être exécutées en une seule fois et ne peuvent pas être interrompues avant qu'elles ne soient complètement achevées [22].

2.3.2 Les ressources

Une ressource est un moyen technique ou humain destiné à être utilisé pour la réalisation d'au moins une tâche et disponible en quantité limitée ou non. Une ressource peut être :

- **Renouvelable** si, après avoir été alloué à une tâche, elle redevient disponible pour les autres dans les mêmes quantités.
- **Consommable** si elle n'est plus disponible ou si la quantité disponible a diminué après avoir été alloué à un certain nombre de tâches.

-
- **Doublement contrainte** lorsque son utilisation instantanée et sa consommation globale sont toutes les deux limitées.
 - **Disjonctive** utilisable par une seule tâche à la fois.
 - **Cumulative** qui peut être utilisée simultanément par plusieurs tâches [22].

2.3.3 Les contraintes

Une contrainte d'ordonnement exprime des limitations sur les valeurs que peuvent prendre les variables représentant les relations entre les tâches et les ressources. il existe plusieurs classifications possibles de contraintes.

Classification en fonction de la disponibilité des ressources et de l'évolution temporelle, cette classification identifie deux types de contraintes en ordonnancement : les contraintes temporelles et les contraintes de ressources

1. **Les contraintes temporelles** : Sont des contraintes liées au temps et sa gestion, il en existe trois types :
 - Contraintes de temps alloué : Elles définissent les dates limites des tâches, en fonction des impératifs de gestion, des délais de livraison ou de la durée totale du projet.
 - Contraintes d'antériorité : Elles décrivent l'ordre dans lequel les tâches doivent être réalisées, en fonction de leur cohérence technologique.
 - Contraintes de calendrier : Elles garantissent le respect des horaires de travail.
2. **Les contraintes de ressources** :
 - **Les contraintes de capacité et d'affectation** se distingue par deux types de ressources :
 - Ressources disjonctives : Une ressource ne peut être utilisée que par une seule tâche à la fois.
 - Ressources cumulatives : Plusieurs tâches peuvent utiliser simultanément une ressource, mais leur nombre total ne doit pas dépasser la capacité de la ressource.
 - **Les contraintes d'affectation** qui existent dans les systèmes flexibles englobent deux types de contraintes :
 - Les contraintes de domaine qui représentent l'ensemble des ressources candidates pour l'exécution d'une tâche.
 - Les contraintes de différence qui imposent l'utilisation de ressources différentes pour la réalisation d'un certain nombre de tâches [20].

Une autre manière de classifier les contraintes est de les classer selon leur relation avec le système de production. On distingue alors deux types de contraintes : endogènes et exogènes.

1. **Les contraintes endogènes** sont celles qui sont directement liées au système de production et à ses performances. Elles incluent :
 - Les dates de disponibilité des machines et des moyens de transport.
 - Les capacités des machines et des moyens de transport.
 - Les séquences des actions à effectuer ou les gammes de produits.
2. **Les contraintes exogènes**, en revanche, sont imposées de l'extérieur et ne dépendent pas directement du système de production. Parmi elles, on trouve :
 - Les dates limites de fabrication imposées par les commandes.
 - Les priorités assignées à certaines commandes ou clients.
 - les retards possibles autorisés pour certains produits [28].

2.3.4 Les objectifs

Un problème d'ordonnancement ne se présente pas toujours comme un problème d'optimisation. Cependant, un critère d'optimisation est indispensable pour juger la pertinence d'un ordonnancement en fonction de ses contraintes opérationnelles. Chaque ordonnancement a pour but d'atteindre un ou plusieurs objectifs, déterminant comment les tâches doivent être planifiées et exécutées. Ces objectifs se répartissent en diverses catégories.

Objectifs liés au temps :

- Minimisation du temps total d'exécution (makespan).
- Minimisation du temps moyen d'achèvement des tâches.
- Minimisation des retards.

Objectifs liés aux ressources :

- Maximisation de la charge d'une ressource.
- Minimisation du nombre de ressources nécessaires.
- Optimisation de l'utilisation des ressources.

Objectifs liés au coût :

- Minimisation des coûts de lancement, de production, de stockage, de transport.
- Optimisation du rapport coût-efficacité.

Objectifs liés à l'énergie ou au débit :

- Réduction de la consommation d'énergie.
- Augmentation de la vitesse d'exécution des tâches [28].

2.4 Classification des problèmes d'ordonnancement

La multitude de variantes des problèmes d'ordonnancement a rendu nécessaire l'élaboration d'une classification. Cette classification permet de décrire les problèmes de manière simple et efficace, facilitant ainsi leur identification et leur compréhension. La notation la plus couramment utilisée en ordonnancement, introduite par Graham et Al en 1979, décrit les problèmes d'ordonnancement à travers trois champs : $\alpha | \beta | \gamma$.

2.4.1 Le champ α

Le champ α décrit la catégorie du problème d'ordonnancement, incluant le nombre de machines et leur organisation. Il se divise en deux sous champs $\alpha = \alpha_1, \alpha_2$. [20]

Le champ α_2 , optionnel, spécifie le nombre de machines dans le problème.

Le champ α_1 désigne le type de machine dans l'atelier et prend les valeurs suivantes :

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

Problèmes à Une Opération

Les problèmes à une opération se concentrent sur une seule étape de transformation de la matière en produit fini.

- Problèmes à une machine $\alpha_1 = 1$

Les problèmes d'atelier à une machine consistent à planifier l'exécution de tâches nécessitant une seule opération sur une machine unique. Dans ce cas, le champ α_2 est absent.

- Problèmes à machines parallèles

Les problèmes d'atelier à machines parallèles représentent une extension des problèmes à une machine unique, où chaque étape est considérée comme une machine virtuelle. Dans ce type d'atelier, chaque opération peut être réalisée par n'importe quelle machine disposée en parallèle

au sein d'une même étape. L'ordonnancement implique donc de déterminer l'affectation et le séquençement des opérations sur chaque machine.

Les machines au sein d'une même étape peuvent varier, ce qui conduit à plusieurs sous-catégories :

Machines parallèles identiques $\alpha_1 = P$: Toutes les machines dans une même étape ont des caractéristiques identiques.

Machines parallèles uniformes $\alpha_1 = Q$:

La durée d'exécution des opérations varie uniformément en fonction de la performance de la machine sélectionnée.

Machines parallèles indépendantes $\alpha_1 = R$:

Les durées opératoires dépendent entièrement de la machine utilisée, sans relation uniforme entre elles. [32]

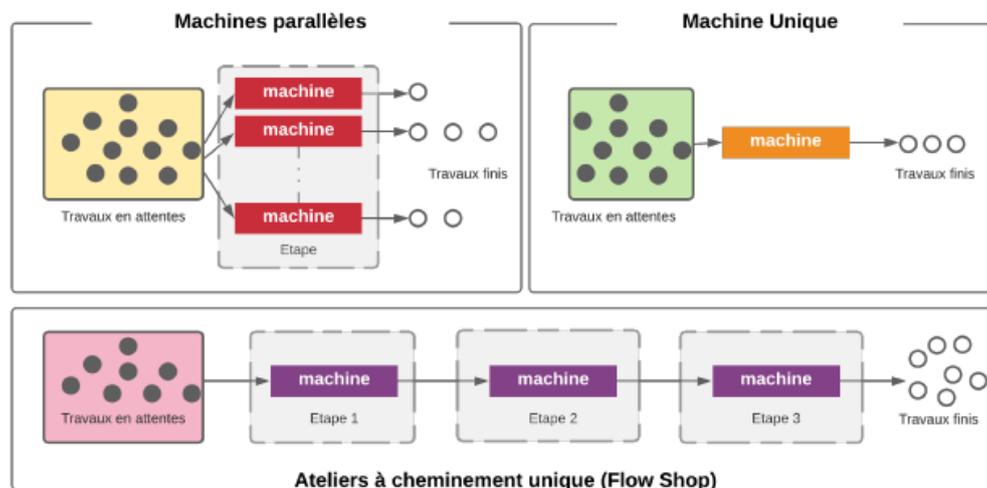


FIGURE 2.2 – Typologie par machine [32]

Problèmes à plusieurs étapes

Les problèmes de la deuxième catégorie sont dits problèmes d'atelier du fait de la nécessité du passage de chaque job sur deux ou plusieurs machines dédiées. Suivant le mode de passage des opérations sur les différentes machines, trois types d'ateliers se distinguent à savoir :

— Ateliers de Type Flow-Shop $\alpha_1 = F$

Appelés aussi ateliers à cheminement unique, ces ateliers comportent une ligne de fabrication composée de plusieurs machines en série. Toutes les opérations de toutes les tâches passent par les machines dans le même ordre (flux unidirectionnel). Il existe aussi des ateliers de type flow-shop hybride, où il peut y avoir plusieurs exemplaires identiques d'une machine, fonctionnant en parallèle.

— Ateliers de Type Job-Shop $\alpha_1 = J$

Connu également sous le nom d'ateliers à cheminement multiple, ce type d'atelier réalise les opérations dans un ordre spécifique, qui varie en fonction de la tâche à exécuter (flux multidirectionnel). Il y'a aussi le job-shop flexible qui est une extension du modèle classique, où plusieurs machines peuvent potentiellement réaliser un sous-ensemble d'opérations.

— Ateliers de Type Open-Shop $\alpha_1 = O$

Ce type d'atelier est moins contraint que les ateliers de type flow-shop ou job-shop. L'ordre des opérations n'est pas fixé à l'avance. L'ordonnancement consiste à déterminer à la fois le cheminement de chaque produit et l'ordre de traitement des produits, en tenant compte des gammes trouvées. L'open-shop est moins couramment utilisé dans les entreprises comparées

aux autres modèles d'ateliers [11].

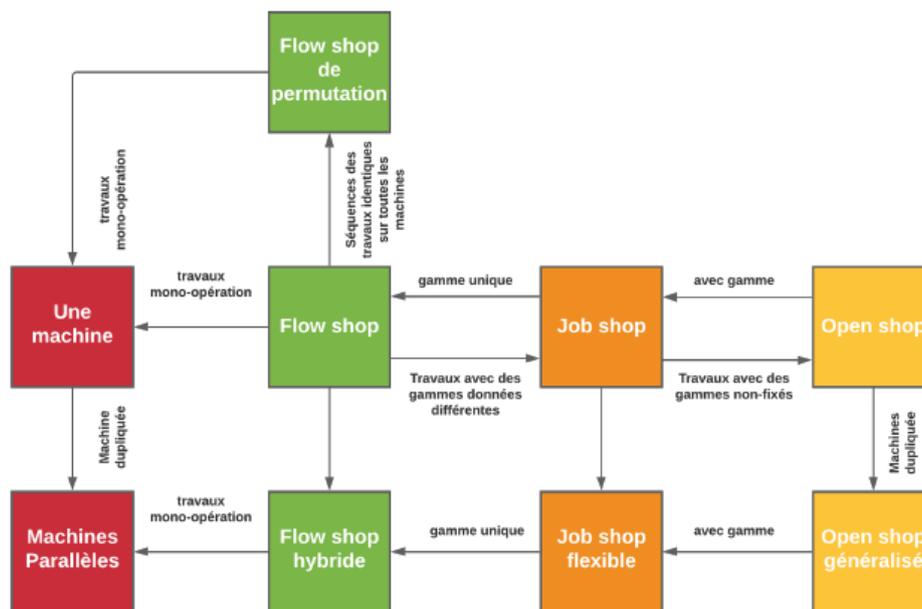


FIGURE 2.3 – Typologie des problèmes d'ordonnancement [32]

2.4.2 Le champ β

Dans ce champ β on effectue l'identification des limitations de la ligne de production et les caractéristiques des tâches il permet de décrire des contraintes supplémentaires du problème. Les principales valeurs de ces sous-champs sont :

- **Préemption "prmp"** : les opérations peuvent être réalisées par segments.
- **Précédence "prec"** : il existe des contraintes générales de précédence entre les opérations, ce qui signifie que certaines tâches doivent être accomplies avant d'autres.
- **Pannes "brkdown"** : les ressources (machines) ne sont pas toujours disponibles.
- **Permutation "prmu"** : l'ordre de passage des jobs sur la première machine est conservé tout au long du système, empêchant toute permutation entre les tâches dans un flow shop, car les files d'attente suivent généralement la règle FIFO (premier arrivé, premier servi).
- **Blocage "block"** : un job terminé doit rester sur la machine précédente, empêchant cette machine de traiter un autre job.
- **No-wait "nwt"** : les jobs ne peuvent pas attendre entre deux machines successives.
- **Recirculation "recrc"** : un job peut passer plus d'une fois sur une machine ou un groupe de machines, typique dans les environnements job shop ou flexible job shop.
- **Restriction d'admissibilité des machines M_j** : un job J ne peut pas être traité par n'importe quelle machine. Le groupe de machines M_j détermine celles qui peuvent traiter le job J.
- **Temps de préparation séquentiel S_{ij}** : le temps de préparation dépend de la séquence entre les jobs J_i et J'_j .
- **Durées opératoires égales $p_{ij} = p_j$** : toutes les durées opératoires sont égales à p_j .
- **Date de disponibilité r_j** : chaque job J a une date à partir de laquelle il est disponible.
- **Date échu d_j** : chaque job J a une date limite à respecter.
- **Temps de préparation machine S_{ri}** : temps nécessaire à la machine M_r pour se préparer à traiter le job J_i .

-
- **Périodes d'indisponibilité** M_r^K : la machine M_r a k périodes durant lesquelles elle n'est pas disponible [28].

2.4.3 Le champ γ

Le dernier champ indique le critère d'optimisation. Il peut prendre de nombreuses valeurs et peut être une combinaison de plusieurs critères. En général, il représente la fonction objective. Voici quelque exemple :

Makespan C_{\max} : Le makespan, défini comme $\max(C_1, \dots, C_n)$, correspond au temps de fin de la dernière tâche à quitter le système. Un makespan minimal implique généralement une exploitation efficace des machines.

Retard maximum L_{\max} : Le retard maximum, est défini comme $\max(L_1, \dots, L_n)$. Il mesure la pire violation des dates d'échéance.

Temps d'achèvement total pondéré ($\sum w_j C_j$) : La somme des temps d'achèvement pondérés des n tâches indique le total des coûts de détention ou d'inventaire encourus par le plan d'ordonnancement. Ce total est souvent appelé temps d'écoulement (flow time) dans la littérature, et la version pondérée est appelée temps d'écoulement pondéré (weighted flow time).

Retard total pondéré ($\sum w_j T_j$) : Cette mesure représente une fonction de coût plus générale que le temps d'achèvement total pondéré, prenant en compte les poids associés aux retards des différentes tâches [32].

2.5 Types d'ordonnancement

Les différents types d'ordonnancement se définissent comme suit :

- Un ordonnancement est semi-actif si aucune tâche ne peut être exécutée plus tôt sans changer l'ordre d'exécution sur une des machines ni violer de contraintes
- Un ordonnancement actif est un ordonnancement où l'on ne peut pas avancer l'exécution d'un job sans retarder celle d'un autre job.
- Ordonnancement sans délai ,on parle d'ordonnancement sans délai (non-delay) lorsqu'aucune opération n'est mise en attente dès qu'une machine est disponible pour l'exécuter [27].

La Figure 2.4 montre que chaque ordonnancement sans délai est actif, et que chaque ordonnancement actif est semi-actif [28].

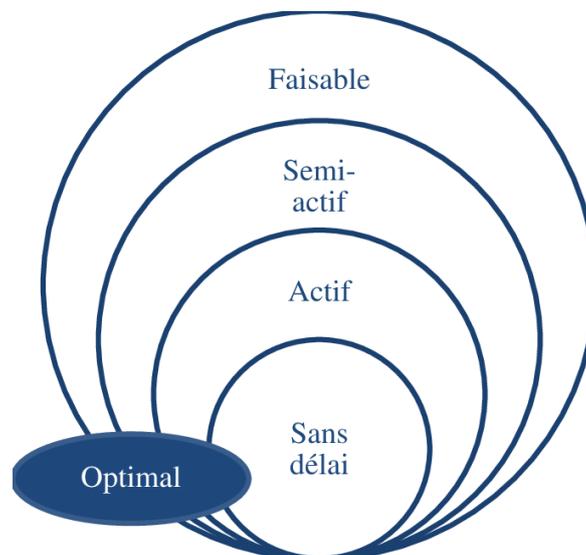


FIGURE 2.4 – Relations entre différent type d'ordonnancement [2]

2.6 Complexité des problèmes d'ordonnement

La théorie de la complexité s'intéresse à la difficulté intrinsèque des problèmes informatiques, et notamment des problèmes d'optimisation combinatoire tels que les problèmes d'ordonnement. Elle s'attache à analyser la complexité des programmes et des algorithmes, afin de déterminer si un problème est "facile" ou "difficile" à résoudre. Cette analyse repose sur des estimations théoriques des temps de calcul et des besoins en mémoire nécessaires pour résoudre le problème[28].

La théorie de la complexité distingue entre problèmes d'optimisation et problèmes de décision. Un problème d'optimisation consiste à trouver une solution admissible qui optimise une fonction objective, tandis qu'un problème de décision se formule de manière que la réponse soit uniquement oui ou non. Chaque problème d'optimisation a un problème de décision correspondant. Pour résoudre un problème d'ordonnement, il est essentiel d'en établir la complexité, car cela détermine la nature de l'algorithme à utiliser[20].

La théorie de la complexité classe les problèmes en différents niveaux de difficulté, voici les classes de complexité :

- La classe de complexité P comprend tous les problèmes de décision qui peuvent être résolus par des algorithmes déterministes en temps polynomial.
- La classe NP (Non-déterministe Polynomial) regroupe les problèmes de décision qui peuvent être résolus par un algorithme non déterministe en temps polynomial. Ces problèmes impliquent des multiples choix à certains points, permettant plusieurs chemins possibles. Pour les résoudre, on peut énumérer toutes les solutions possibles, qui peuvent ensuite être vérifiées en temps polynomial.
- Un problème de décision est NP-complet si tous les problèmes de la classe NP peuvent y être réduits. Par conséquent, si un algorithme polynomial est trouvé pour un problème NP-complet, alors tous les problèmes NP peuvent être résolus en temps polynomial.
- Un problème d'optimisation est dit NP-difficile (NP-hard) si le problème de décision correspondant est NP-complet. Ces problèmes nécessitent généralement un temps exponentiel pour être résolus par des méthodes approchées (heuristiques)[28].

La plupart des problèmes d'ordonnement sont NP-difficiles, ce qui signifie qu'il n'existe pas d'algorithme polynomial connu pour les résoudre de manière optimale. Cela signifie que le temps nécessaire pour résoudre un problème d'ordonnement NP-difficile augmente de manière exponentielle avec la taille du problème.

Malgré cette difficulté théorique, il existe des algorithmes d'approximation et des heuristiques qui permettent de trouver des solutions acceptables en un temps raisonnable. Ces algorithmes ne garantissent pas de trouver la solution optimale, mais ils peuvent fournir des solutions suffisamment proches de l'optimum pour être utiles dans la pratique.

2.7 Les méthodes de résolution d'un problème d'ordonnement

Les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnement s'appuient sur diverses techniques d'optimisation combinatoire telles que la programmation mathématique, la programmation dynamique, les procédures de séparation et évaluation, et la théorie des graphes.

En général, ces méthodes garantissent l'optimalité de la solution obtenue. Cependant, les algorithmes dont la complexité n'est pas polynomiale ne sont pas utilisables pour des problèmes de grande

taille, ce qui rend nécessaire le développement de méthodes de résolution approchées, efficaces pour ces problèmes souvent NP-difficiles.

- Les différentes méthodes de résolution développées peuvent être classées en deux catégories :
- Les méthodes exactes, qui garantissent l'exhaustivité de la résolution.
 - Les méthodes approchées, qui sacrifient l'exhaustivité pour gagner en efficacité [20].

2.7.1 Les méthodes exactes

On peut définir une méthode exacte comme étant une méthode qui fournit une solution optimale pour un problème d'optimisation. L'utilisation de ce type de méthodes s'avère particulièrement intéressante dans les cas des problèmes de petites tailles. Le but des méthodes exactes est de trouver, en un temps de calcul le plus court possible, la solution optimale du problème [11]. Parmi les méthodes exactes, on retrouve :

1. La méthode **BRANCH AND BOUND**

L'algorithme Branch and Bound procède en allouant progressivement les tâches aux ressources tout en explorant un arbre de recherche représentant toutes les combinaisons possibles. L'objectif est de trouver la configuration optimale en éliminant les branches de l'arbre qui mènent à des solutions inefficaces. Cet algorithme explore de manière exhaustive l'espace des solutions pour identifier la meilleure. La méthode de l'algorithme Branch and Bound inclut les étapes suivantes :

- Diviser l'espace de recherche en plusieurs sous-espaces.
- Calculer une borne inférieure pour la fonction objectif associée à chaque sous-espace.
- Éliminer les sous-espaces non prometteurs.
- Répéter ces étapes jusqu'à obtenir la solution optimale globale [34].

2. La programmation linéaire

La programmation linéaire est une technique traditionnelle de recherche opérationnelle qui implique la formulation du problème sous forme de modèles mathématiques linéaires. Son objectif est d'optimiser une fonction objectif tout en respectant les contraintes liées à l'ordonnancement [34].

3. La programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode couramment employée pour résoudre des problèmes d'ordonnancement comportant des contraintes temporelles strictes. Elle repose sur le principe de Bellman, qui consiste à décomposer le problème en sous-problèmes plus petits. Chaque sous-problème est résolu de manière itérative, et les solutions optimales de ces sous-problèmes sont ensuite combinées pour obtenir la solution globale [34].

4. Les heuristiques : Les heuristiques sont des méthodes empiriques qui, bien qu'elles ne garantissent pas une solution optimale, produisent généralement de bons résultats. Elles s'appuient sur des règles simplifiées pour optimiser un ou plusieurs critères. Ces méthodes se divisent en deux catégories principales : les méthodes constructives et les méthodes de recherche locale. L'objectif général de ces méthodes est d'incorporer des stratégies décisionnelles pour construire une solution proche de l'optimum tout en maintenant un temps de calcul raisonnable. Voici quelques stratégies couramment utilisées :

- FIFO (First In First Out) : La première tâche arrivée est la première à être ordonnancée.
- SPT (Shortest Processing Time) : La tâche ayant le temps opératoire le plus court est traitée en premier.
- LPT (Longest Processing Time) : La tâche ayant le temps opératoire le plus long est traitée en premier.
- EDD (Earliest Due Date) : La tâche avec la date d'échéance la plus proche est prioritaire [11].

2.7.2 Les méthodes approchées

Les méthodes approchées sont des algorithmes itératifs efficaces pour traiter des problèmes d'optimisation complexes que les méthodes exactes ne peuvent pas résoudre en un temps raisonnable en raison de la complexité du problème. Compte tenu de ces difficultés, la plupart des spécialistes de l'optimisation combinatoire ont orienté leurs recherches vers le développement des métaheuristiques.

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"[11].

Les métaheuristiques sont des algorithmes d'optimisation utilisés pour résoudre des problèmes complexes. Elles représentent une approche générale pour explorer l'espace des solutions de ces problèmes, offrant ainsi une alternative aux méthodes heuristiques traditionnelles, notamment lorsque aucune heuristique spécifique n'est disponible [34].

Trois approches distinctes peuvent être identifiées dans le domaine des métaheuristiques :

1. **Approche de voisinage** : Ces algorithmes partent d'une solution initiale, obtenue de manière exacte ou aléatoire, et s'éloignent progressivement de celle-ci en suivant une trajectoire ou un parcours progressif dans l'espace des solutions. On recense dans cette approche :
 - **Le recuit simulé** : Le recuit simulé est une des métaheuristiques les plus connues incluant l'acceptation de transformations dégradant le coût de la solution courante. Elle tire son nom du domaine de la métallurgie. Cette métaheuristique est caractérisée par la présence d'une variable de contrôle appelée température (par analogie aux processus thermodynamiques dont elle s'inspire) qui fixe les conditions dans lesquelles une transformation dégradante est acceptée[30].
 - **La recherche taboue** : La recherche taboue (TS) est une méta-heuristique qui guide les procédures de recherche locale dans l'exploration de l'espace des solutions, en allant au-delà de l'optimum local. Elle utilise un historique de manière à interdire à l'algorithme de revenir sur ses pas. Cet historique se traduit par la présence d'une liste dite taboue qui garde une trace des dernières solutions visitées, ainsi l'algorithme ne pourra plus explorer ces solutions (du moins à court terme, tout dépend de la taille de la liste taboue)[23].
2. **Approche évolutive** : Ces algorithmes sont basés sur une population de solutions, travaillant simultanément sur un ensemble de solutions et les faisant évoluer progressivement. Cette catégorie comprend :
 - **Les algorithmes génétiques** : Les algorithmes génétiques sont des méthodes de population qui agissent sur un ensemble de solutions. Ils s'inspirent du processus de reproduction naturelle pour développer une méthode de recherche robuste pouvant être appliquée à des problèmes complexes d'optimisation combinatoire.

L'algorithme génétique peut être vu comme une méthode avec mémoire, où la mémoire est constituée par la population de solutions. Cette population évolue au fil des générations par des opérateurs de sélection, croisement et mutation, permettant de converger vers de meilleures solutions[23].
 - **Les algorithmes par colonies de fourmis** : Les algorithmes de colonies de fourmis s'inspirent du comportement des fourmis pour résoudre des problèmes complexes. Ces insectes laissent des traces de phéromones sur le sol en se déplaçant. Lorsqu'une fourmi trouve de la nourriture, elle retourne à son nid, renforçant la piste de phéromones si elle a emprunté le chemin le plus court. D'autres fourmis suivent ces pistes marquées, ce qui intensifie le marquage des trajets optimaux. Ainsi, à force d'allers-retours, la colonie identifie et utilise

collectivement le chemin le plus court entre le nid et la source de nourriture [30].

- **L'optimisation par essaim particulaire** : L'OEP est une méthode d'optimisation basée sur une population d'individus appelés particules qui évoluent dans le temps. Les particules se déplacent dans un espace de recherche, en ajustant leur position en fonction de leur propre expérience et de celle de leurs voisines. Chaque particule est guidée par sa meilleure position rencontrée et par la meilleure position atteinte par l'ensemble de l'essaim, ce qui permet une convergence vers des zones prometteuses de l'espace de recherche [11].

3. **Approche hybride** : Cette approche combine différents concepts ou techniques provenant d'autres métaheuristiques pour résoudre un problème d'optimisation.[34]

2.8 Problème de type JOB SHOP

Le problème de type job-shop est l'un des plus étudiés dans la littérature de l'ordonnancement. Son importance théorique et la modélisation de nombreuses applications industrielles sous forme de systèmes de type job-shop le rendent très intéressant [17].

En effet, il appartient à la catégorie des organisations à ressources multiples, et plus particulièrement à l'ordonnancement dans les ateliers à cheminements multiples. Vu cette multitude de ressources et de cheminements, ce problème est considéré comme le plus complexe à traiter par rapport aux autres ateliers [31].

Sa difficulté réside dans le fait que chaque job a son propre chemin et son propre nombre de machines à visiter. La complexité de ce type de problème augmente considérablement avec l'augmentation du nombre de machines et/ou du nombre de jobs [19].

La particularité du job-shop réside dans la gamme opératoire qui n'est pas fixe, ainsi que le nombre d'opérations qui n'est pas forcément le même pour tous les jobs.

Ils sont composés d'un ensemble de n jobs, chacun composé d'un ensemble de n_i opérations qui peuvent être exécutées sur m machines en respectant les contraintes suivantes :

- L'ordre de passage des opérations d'un job sur les différentes machines est fixe pour chaque job et peut-être différent d'un job à un autre.
- Une machine ne peut exécuter qu'une seule opération à la fois et à l'instant initial toutes les machines sont disponibles.
- Une opération ne peut être exécutée que sur une seule machine et sans interruption.
- La capacité de stockage entre les machines est considérée comme infinie.
- La préemption des opérations n'est pas autorisée.

L'objectif du problème d'ordonnancement consiste à trouver le meilleur enchaînement des opérations afin de minimiser ou maximiser un certain critère, ainsi que les instants de début des opérations sur chaque machine. Parmi les critères à optimiser, la minimisation de la date de fin de toutes les opérations sur toutes les machines est considérée dans la majorité des études de la littérature. Ce critère est appelé dans la littérature C_{\max} ou makespan.[17]

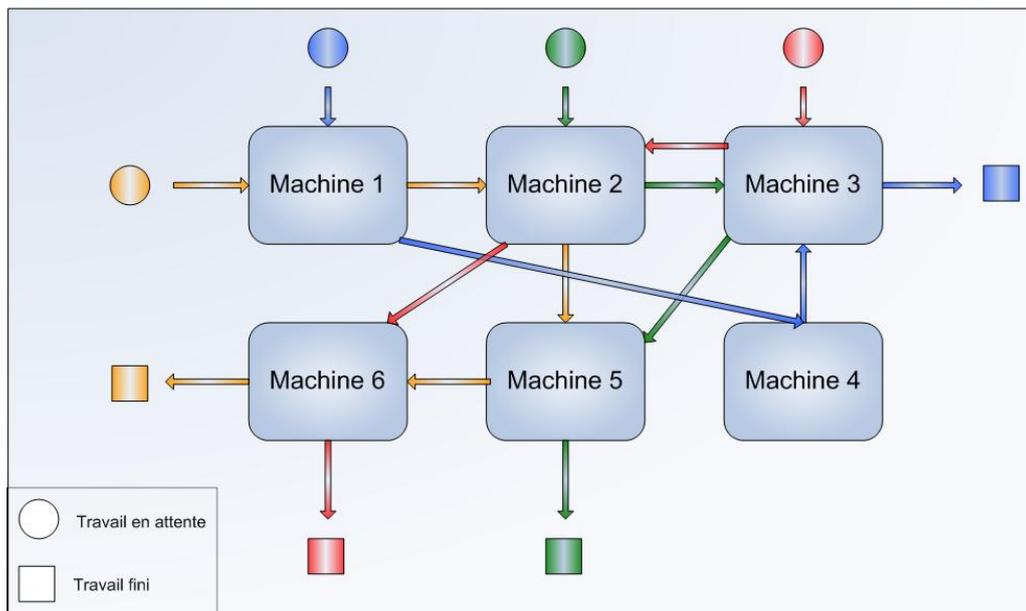


FIGURE 2.5 – Atelier de type Job Shop [3]

Les problèmes de job-shop sont classés parmi les problèmes NP-difficiles au sens fort. Cependant, il existe certains cas particuliers de problèmes de job-shop qui peuvent être résolus en temps polynomial. Voici deux exemples de ces cas spécifiques :

- Problème de Job-Shop à Deux Jobs Ce problème peut être résolu à l'aide d'un algorithme polynomial basé sur une représentation géométrique. Cette méthode permet de visualiser et de résoudre le problème plus facilement, en exploitant les caractéristiques spécifiques des deux jobs à ordonnancer.
- Problème de Job-Shop à Deux Machines Pour ce type de problème, une généralisation des règles de Jackson (1956) a été proposée. Ces règles permettent de résoudre des cas particuliers de job-shop à deux machines, notés $J_2||C_{\max}$, en utilisant l'algorithme de Johnson. Cet algorithme, de nature analytique, classe les tâches en deux groupes selon une règle spécifique, puis les ordonne dans chaque groupe selon certains critères, avec pour objectif de minimiser le makespan (durée totale d'exécution).

Les algorithmes mentionnés ci-dessus font partie des méthodes exactes. Bien qu'ils soient efficaces pour les problèmes de petite taille, leur performance se dégrade rapidement lorsque la taille des problèmes augmente. En effet, la complexité et les ressources nécessaires pour résoudre des problèmes de job-shop à grande échelle rendent ces algorithmes impraticables pour des applications industrielles plus complexes[17].

Dans notre mémoire, nous étudions un problème de type NP-difficile, ce qui nous conduit à utiliser des méthodes approchées pour trouver des solutions efficaces. Nous avons choisi d'appliquer l'algorithme de recuit simulé, une métaheuristique qui sera détaillée dans la section suivante.

2.9 Algorithme du RECUIT SIMULE

Le recuit simulé (RS) est une métaheuristique de recherche locale basée sur un principe physique utilisé par les forgerons. Cette méthode imite le processus de recuit, qui consiste à chauffer puis refroidir le fer pour en améliorer la résistance et la structure. Elle est également appliquée pour simuler le filtre de Metropolis, proposé par Metropolis et al. en 1953.

Les travaux de trois chercheurs d'IBM, publiés par Kirkpatrick et al. en 1983, présentent une version du recuit simulé capable d'éviter les minimums locaux. Sous certaines conditions, cette méthode peut atteindre l'optimum global avec une probabilité proche de 1, un avantage majeur par rapport à d'autres techniques qui ne garantissent pas ce résultat [21].

Ces chercheurs ont été les premiers à adapter la technique de recuit physique aux problèmes d'optimisation combinatoire. Le principe repose sur l'analogie entre un problème d'optimisation combinatoire et un système physique évoluant à une certaine température. Ce système, d'aspect thermodynamique, est défini par ses degrés de liberté et son énergie globale E , correspondant à la fonction objective à minimiser, ainsi que par un paramètre fictif T décrivant la température du système [31].

En effet, une nouvelle solution de coût supérieur à celui de la solution courante ne sera pas forcément rejetée. Son acceptation sera déterminée aléatoirement en tenant compte de la différence entre les coûts ainsi que du facteur température T . Ce paramètre sert à prendre en compte le fait que plus le processus d'optimisation est avancé, moins on est prêt à accepter une solution plus coûteuse. Par contre, l'acceptation de solutions fortement coûteuses permet, au début, de mieux explorer l'espace des solutions possibles et ainsi d'accroître les chances d'approcher le minimum global [11].

La recherche du minimum par l'algorithme du recuit simulé se fait à partir d'une solution initiale X . On choisit un état voisin Y dans le voisinage de X noté $V(X)$. La transition vers cet état est acceptée si son énergie (coût) est inférieure ou égale à celle de X . Si l'on note $H(X)$ et $H(Y)$ les énergies respectives des états X et Y , cela signifie que $H(Y)$ doit être inférieur ou égal à $H(X)$. Dans le cas contraire, la transition est acceptée, bien qu'elle soit défavorable (augmentation de l'énergie), avec une probabilité P dépendant de la température T , de $H(X)$ et de $H(Y)$, définie par :

$$P = e^{-\frac{H(Y)-H(X)}{T}}$$

La probabilité P permet à l'algorithme d'admettre des transitions défavorables et donc de sortir d'un éventuel minimum local.

La simulation du recuit simulé démarre par une solution initiale admissible et continue l'exploration de l'espace d'états en faisant subir à la solution courante des faibles perturbations aléatoires. Si la solution suivante (voisine) obtenue améliore le critère à optimiser, alors elle est retenue. Sinon, si elle provoque une dégradation ΔE du même critère, cette solution sera acceptée avec une probabilité :

$$P = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$$

Dans la Figure 2.6 nous allons voir le fonctionnement général du recuit simulé[31].

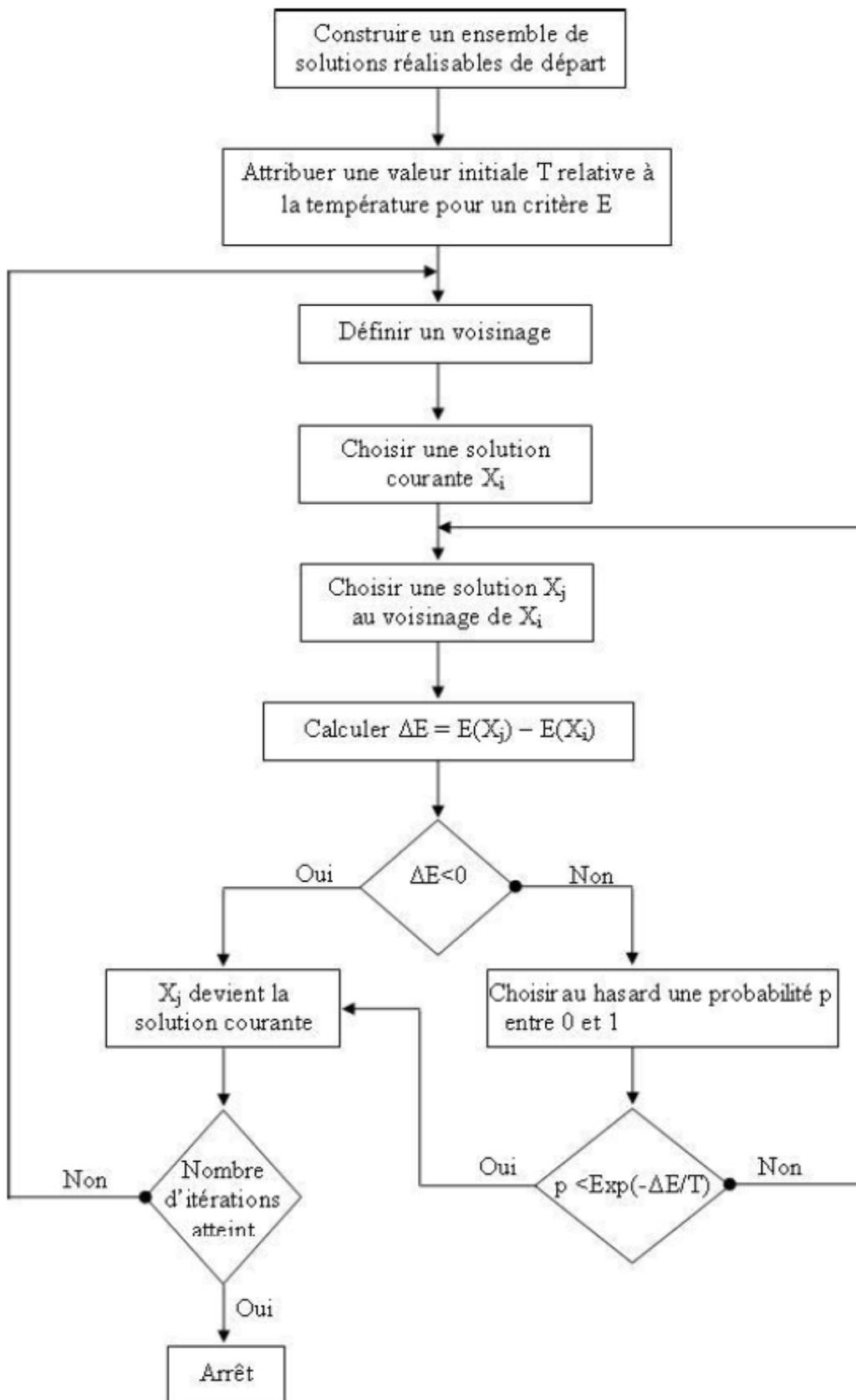


FIGURE 2.6 – Algorithme relatif au fonctionnement général du recuit simulé [11]

2.10 Conclusion

En guise de conclusion, l'ordonnancement de la production représente un domaine d'étude essentiel pour améliorer l'efficacité et la compétitivité des processus industriels. Les concepts clés, tels que les tâches, les ressources et les contraintes, constituent les éléments fondamentaux de tout problème d'ordonnancement. La classification des problèmes offre un cadre structuré pour analyser et résoudre ces problèmes.

La complexité inhérente aux problèmes d'ordonnancement, notamment ceux de type job shop, nécessite l'utilisation de méthodes avancées de résolution. Parmi ces méthodes, l'algorithme du recuit simulé qui se distingue par sa capacité à fournir des solutions de haute qualité dans des délais raisonnables, en explorant efficacement l'espace des solutions possibles.

À travers ce chapitre, nous avons établi les bases théoriques nécessaires pour appréhender l'ordonnancement de la production. Ce cadre théorique sert de fondement à notre étude empirique, où nous appliquons les concepts et les méthodes discutés pour optimiser l'ordonnancement de la production dans un atelier de type job shop au sein de SOPHAL.

Chapitre 3

Mise en place des solutions et des résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre présente la solution développée dans le cadre de notre étude ainsi que les résultats obtenus. Nous détaillons l'implémentation de l'application VBA, en commençant par une description approfondie de la problématique, des outils utilisés et des fonctionnalités de l'application.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première partie, nous utilisons l'application VBA sans introduire les temps de changement. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à une simulation de l'atelier réalisée avec le logiciel LEKIN, qui ne prend également pas en compte les temps de changement. Cette comparaison permet de valider la précision de notre application dans des conditions simplifiées.

Dans la deuxième partie, nous intégrons les temps de changement ainsi que les quantités de produits et analysons leur impact. Cette section inclut les nouvelles données, les améliorations apportées à l'interface utilisateur. Nous montrons comment l'intégration des temps de changement permet une planification plus réaliste et optimisée, démontrant l'efficacité accrue de notre solution.

3.2 Problématique

L'ordonnancement des produits dans un atelier de production est une tâche complexe et cruciale, impactant directement l'efficacité et la compétitivité de l'entreprise. Cette complexité est particulièrement exacerbée dans les environnements de type job shop, où les tâches doivent être planifiées de manière optimale en tenant compte de diverses contraintes de ressources et de temps. La gestion efficace de ces contraintes est essentielle pour minimiser les délais de production et maximiser l'utilisation des ressources disponibles.

SOPHAL rencontre des difficultés à optimiser les processus de production dans ses différentes unités. Nous nous sommes principalement concentrées sur l'unité 2 spécialisée dans la production de comprimés, gélules et préparation suspensions buvables. Cette unité est un atelier de type job shop avec quatorze produits et treize machines, ce qui rend l'ordonnancement des tâches très complexe (problème NP-difficile). Les outils d'ordonnancement existants ne répondent pas adéquatement aux besoins spécifiques de l'entreprise, entraînant ainsi des inefficacités et des retards.

Dans notre étude, nous avons identifié plusieurs défis spécifiques liés à l'ordonnancement des produits, parmi lesquels :

La diversité des produits et des processus de fabrication : Chaque produit peut nécessiter une

séquence différente de machines et un temps de traitement spécifique.

- Comment ordonnancer efficacement la production de divers produits ayant chacun des processus de fabrication uniques ?

Les temps de changement : L'intégration des temps nécessaires pour passer d'une production à une autre est souvent négligée, ce qui peut entraîner des inefficacités et des délais supplémentaires.

- Comment inclure de manière précise et efficace les temps de changement dans notre ordonnancement ?

Les quantités de production et les tailles des lots : Varier les quantités de produits à fabriquer ainsi que les tailles de lots ajoutent une dimension supplémentaire à la planification, car il faut ajuster l'ordonnancement en conséquence pour optimiser les ressources.

- Comment ajuster notre ordonnancement pour prendre en compte les variations dans les quantités de production et les tailles des lots tout en maintenant une efficacité optimale ?

Pour faire face à ce problème tout en tenant compte des différentes contraintes, nous avons développé une application VBA intégrant un algorithme de recuit simulé. Cet algorithme est particulièrement adapté pour résoudre les problèmes d'optimisation complexes, comme celui de l'ordonnancement pour le cas d'un problème NP-difficile, en permettant d'explorer efficacement l'espace des solutions possibles et de trouver des solutions de haute qualité dans des délais raisonnables.

L'application VBA que nous avons conçue vise à fournir une solution pratique et automatisée pour l'ordonnancement des produits, en tenant compte des contraintes et des spécificités de notre environnement de production. Les résultats obtenus démontrent la capacité de notre solution à améliorer significativement l'efficacité de la planification et à répondre aux défis identifiés. En répondant à ces questions, nous cherchons à améliorer continuellement notre approche et à proposer une solution qui soit non seulement théoriquement efficace, mais aussi pratiquement applicable dans des contextes industriels réels.

3.3 L'outil VBA

Visual Basic pour Applications (VBA) est utilisé pour écrire des programmes pour le système d'exploitation Windows. Il fonctionne comme un langage de programmation interne dans les applications Microsoft Office (MS Office, Office), notamment Access, Excel, PowerPoint, Publisher, Word et Visio [8].

VBA a été développé par Microsoft en 1993. Il s'agit d'un langage de programmation dérivé du Visual Basic (VB). Le nom "Visual Basic for Applications" reflète son origine et son but : créer des applications visuelles pour les utilisateurs de Microsoft Office.

VBA est utilisé pour créer des macros, des programmes et des interfaces utilisateur dans les applications Office. Il permet de personnaliser et d'automatiser les tâches, ainsi que de traiter et d'échanger des données entre les différentes applications de la suite Office [7].

Une macro est un petit programme développé dans le langage VBA et qui va permettre d'effectuer une série d'instructions au sein des logiciels de la suite Office, c'est essentiellement une séquence de caractères dont les entrées aboutissent à une autre séquence de caractères (sa sortie).

Pour bien travailler avec VBA, il est crucial de comprendre certaines conditions et concepts importants :

- **Module :** Un module est l'endroit où Excel stocke le code VBA. Des informations concernant les modules d'une feuille de calcul peuvent être trouvées dans l'Explorateur de projets. Tous les modules peuvent être enregistrés dans un dossier de modules.

-
- **Objets** : La plupart du code est utilisé pour manipuler des objets dans VBA. Les objets sont des éléments tels que des classeurs, des feuilles de calcul, des cellules, des plages de cellules ou des polices de cellules. Les objets sont souvent sélectionnés ou mentionnés comme faisant partie du code.
 - **Procédures** La procédure fait partie d'un programme informatique qui effectue une tâche spécifique. C'est le bloc de code qui commence par une déclaration et se termine par une déclaration de fin. Il existe deux types de procédures dans VBA. Les sous-procédures forment une action dans Excel et commencent par le texte « Sub ». Les procédures fonctionnelles effectuent des calculs et renvoient une valeur.
 - **Déclaration** Une déclaration en VBA peut être divisée en deux types. Premièrement, une instruction de déclaration est utilisée pour définir des éléments tels que des valeurs constantes ou des variables. Deuxièmement, les instructions exécutables désignent un code qui spécifie et exécute une certaine action.
 - **Variables** Les variables sont des emplacements de stockage pour les éléments définis. Ils contiennent des valeurs spécifiques qui peuvent changer à mesure que les scripts VBA sont exécutés [8].

3.4 Description de l'application VBA

3.4.1 Contexte et objectifs de l'application

L'application VBA a été développée pour répondre aux besoins spécifiques de l'entreprise SOPHAL en matière d'ordonnancement des produits. L'objectif principal est de fournir un ordonnancement optimal des produits sur les machines en utilisant une approche basée sur une métaheuristique, qui est le recuit simulé, tout en prenant en compte les contraintes de changement et de nettoyage. Cette solution vise à améliorer l'efficacité et la productivité de l'atelier en minimisant les temps morts.

3.4.2 Fonctionnalités principales

L'application VBA intègre plusieurs fonctionnalités clés pour réaliser un ordonnancement optimal :

- **Modification des données** : Les utilisateurs peuvent ajuster les données selon le format de la feuille Excel existante, ce qui permet une flexibilité dans l'utilisation de l'application avec différents ensembles de données.
- **Ordonnancement avec recuit simulé** : Utilisation d'une métaheuristique avancée, le recuit simulé, pour générer des solutions optimales en tenant compte des contraintes de changement et de nettoyage.
- **Calcul des quantités à produire** : Basé sur les prévisions de ventes, l'application calcule les lots à produire pour chaque produit. Ce calcul se fait en ajustant les tailles des lots en fonction des besoins de production.
- **Interface utilisateur intuitive** : L'application dispose d'une interface conviviale permettant aux utilisateurs de saisir des données, lancer des calculs, et visualiser les résultats sous forme de tableaux.

3.4.3 Méthodologie de développement

Le développement de l'application VBA s'est déroulé en plusieurs étapes clés :

- **Analyse des besoins** : Cette phase initiale a impliqué une compréhension approfondie des besoins spécifiques de l'entreprise SOPHAL en matière d'ordonnancement. Nous avons collecté des données concrètes et précises pour garantir une base solide. Cela a été accompli grâce à des

interviews et des investigations avec les leaders de production et les opérateurs, afin d'assurer que toutes les contraintes et exigences pratiques étaient bien prises en compte.

- **Conception de l'algorithme** : Élaboration de l'algorithme de recuit simulé, adapté aux particularités des contraintes de changement et de nettoyage propres à l'atelier de production.
- **Développement et intégration** : Le développement de l'application en VBA a été entièrement basé sur les données recueillies et sur le format spécifique de chaque feuille de calcul. Cela a permis une intégration fluide et une utilisation optimale des informations disponibles.
- **Tests et validation** : Test de l'application avec les données réelles fournies par l'entreprise, validation des résultats obtenus avec notre encadrant de l'entreprise, et ajustements nécessaires pour garantir l'efficacité et la fiabilité de l'application.

3.4.4 Interface utilisateur et processus d'utilisation

L'entreprise nous a fourni un fichier Excel contenant trois feuilles principales :

- Prévisions de vente.
- Temps de nettoyage de chaque machine.

Les salles de machines	Temps de nettoyage
Salle de pesée	1h30
Salle de granulation	7h
Salle de compression "G"	8h
Salle de compression "RK"	8h
Salle de compression "H"	8h
Salle d'enrobage	4h
Salle de remplissage"PSB"	10h
Salle de remplissage"gel"	10h
Blistéreuse "L"	10h
Blistéreuse "HL"	10h
Salle de conditionnement secondaire"L"	10h
Salle de conditionnement secondaire"HL"	10h
Salle de conditionnement secondaire"PSB"	4h

TABLE 3.1 – Données de nettoyage

- Liste des médicaments de l'unité deux.

La feuille des médicaments contient des informations sur 14 produits et 13 machines, incluant les temps de traitement spécifiques pour chaque produit sur chaque machine ainsi que les tailles de lots. Notre travail a commencé principalement sur cette feuille nommé "**Unité2**".

UNITE 2		FABRICATION										CONDITIONNEMENT				
DESIGNATION PRODUIT	Taille de lot	PESEE DS 2400 ET BALANCE INDUSTRIELLE COCOS ¹⁸ 7510A	GRANULATEUR GANSONS HSMG (MELANGEUR GANSON- BR/600L	COMPRIMEUSE GYLONGI FG- 24	COMPRIMEUSE ROMACO KILLIAN B/5370 PRIM	COMPRIMEUSE HANUN GCP ¹⁴	ENBOUEUSE GANSONS GAC 15000	REMPLISSAGE PFB ROMACO MACOFAL	REMPLISSAGE GEULLE ACG-PAM(LAF)	BIEREUSE EN LIGNE MACH EPY 3010PDA	BIEREUSE HORS LIGNE ELMACH 3010I	C S (COMPRIMEE/ GEULE) ENLIGNE	C S (COMPRIMEE/ GEULE) HORS LIGNE	C S PFB		
CEBROKAL 1G B/12 Cps	12 500	1.3000	1.3000	7.0000		4.0000				6.0000	13.0000					
LEXINAL SOPHAL 1G B/12 Cps.	12 000	1.3000	1.3000	6.0000		4.0000				5.0000	5.0000					
OROKAL 200mg B/8 Cps.	75 000	1.3000	2.0000			14.0000	7.0000				14.0000		35.0000			
ZINENTAL 200mg CP B/14	35 714	1.3000	1.3000	16.0000		7.0000				35.0000		7.0000				
ZINENTAL 500mg CP B/14	12 857	1.3000	1.3000	7.0000		7.0000				21.0000		21.0000				
CLOKAFAL 500 mg B/14 Glets	19 737	1.3000	2.0000						10.0000	14.0000		29.0000				
LEXINAL 500mg B/20 Glets	15 000	1.3000	2.0000						14.0000	14.0000		28.0000				
OMNIFAL 300mg B/10 Glets	22 000	1.3000	2.0000						8.0000							
OROKAL 400mg B/04 Glets	10 000	1.3000	2.0000						16.0000	12.0000		12.0000				
LEXINAL 250mg/5ml B/100ml	8 000	2.0000	2.0000				5.0000							5.0000		
LEXINAL 125 mg/5ml B/100ml	8 000	2.0000	2.0000				5.0000							5.0000		
OROKAL 100mg/5ml B/40ml	20 000	2.0000	7.0000				14.0000							14.0000		
OROKAL 40 mg/5ml B/40ml	20 000	2.0000	7.0000				14.0000							14.0000		
LEXINAL 500 MG CP B/12	20 000	1.3000	7.0000	8.0000			7.0000			14.0000		28.0000				

FIGURE 3.1 – Fichier excel avec les différents feuilles

Tout d'abord, nous avons commencé par concevoir l'interface de l'application, en mettant en place un accès restreint réservé aux utilisateurs autorisés.

FIGURE 3.2 – Interface principale de l'application

Choix des Produits

Premièrement, nous avons créé un bouton "Choix de produits".

En cliquant sur ce bouton, un formulaire utilisateur "Affichage des produits" s'affiche, contenant une liste déroulante des médicaments disponibles (voir 3.4).

Logout		FABRICATION								CONDITIONNEMENT				
DESIGNATION PRODUIT	Taillelot	PESEE	GRANULATE	COMPRIMEUSE	COMPRIMEUSE E2	COMPRIMEUSE E3	ENROBEUSE	REPLISSAGE PSB	REPLISSAGE GEL	BLISTEREUSE F N L	BLISTEREUSE H ORS L	C S_ENLIG	C S_HORS LIGNE	C S_PSI
CEDROXAL 1G B/12 Cps	12 500	1:30:00	1:30:00		7:00:00					6:00:00		13:00:00		
LEXINAL SOPHALIG B/12 Cps	12 083	1:30:00	1:30:00		5:30:00		4:00:00			5:00:00		9:00:00		
OROKAL 200mg B/8 Cps	75 000	1:30:00	2:00:00			14:00:00	7:00:00				14:00:00		35:00:00	
ZINETAL 250mg CP B/14	35 714	1:30:00	1:30:00		14:00:00		7:00:00					35:00:00	7:00:00	
ZINETAL 500mg CP B/14	17 857	1:30:00	1:30:00		7:00:00		7:00:00					21:00:00	21:00:00	
CLORAFAL 500 mg B/16 Gles	19 737	1:30:00	2:00:00						10:00:00			14:00:00	29:00:00	
LEXINAL 500mg B/20 Gles	15 000	1:30:00	2:00:00							14:00:00		14:00:00	28:00:00	
OMNIFAL 300mg B/10 Gles	22 000	1:30:00	2:00:00							8:00:00				
OROKAL 400mg B/06 Gles	10 000	1:30:00	2:00:00							16:00:00		12:00:00		
LEXINAL 250mg/5ml fl.100ml	8 000	2:00:00	2:00:00					5:00:00						5:00:00
LEXINAL125 mg/5ml fl.100ml	8 000	2:00:00	2:00:00					5:00:00						5:00:00
OROKAL 100mg/5ml fl.40ml	20 000	2:00:00	7:00:00					14:00:00						14:00:00
OROKAL 40 mg/5ml fl.40ml	20 000	2:00:00	7:00:00					14:00:00						14:00:00
LEXINAL 500 MG CP B/12	20 000	1:30:00	7:00:00	8:00:00			7:00:00			14:00:00		28:00:00		

FIGURE 3.3 – Création du bouton "Choix de produits"

FIGURE 3.4 – Formulaire utilisateur "Affichage des produits"

Après avoir sélectionné un médicament et cliqué sur "Afficher machines", les machines nécessaires pour ce produit sont colorées, ainsi que la taille de lot spécifique s'affiche dans un textebox .

FIGURE 3.5 – Affichage des machines du produit

Ordonnancement des Produits

En cliquant sur le bouton "Ordonnancer", l'algorithme de recuit simulé s'exécute pour déterminer le séquençement optimal des produits. Le résultat est affiché dans un autre userform, qui présente le séquençement optimal avec les dates de début et de fin pour chaque produit ainsi que le temps d'attente. Le t_{max} (temps de complétion maximale) est affiché en bas du formulaire.

Un bouton "Afficher les détails" permet de voir le temps de traitement de chaque produit sur chaque machine ainsi que les temps d'attente.

Affichage de l'ordonnancement

Séquence	Date début	Date fin	Temps d'attente
CEDROXAL 1G B/12 Cps	0	1740	0
CLORAFAL 500 mg B/16 Gles	90	2100	150
LXINAL 250mg/5ml fl.100ml.	180	1020	180
OROKAL 100mg/5ml fl.40ml	300	2520	300
ZINETAL 500mg CP B/14	420	4320	780
OROKAL 400mg B/06 Gles	510	5040	2430
LXINAL 500 MG CP B/12	600	5280	2790
OROKAL 40 mg/5ml fl.40ml	690	3570	1350
LXINAL SOPHAL1G B/12 Cps.	810	5580	4230
ZINETAL 250mg CP B/14	900	6000	3360
LXINAL125 mg/5ml fl.100ml	990	3870	3030
LXINAL 500mg B/20 Gles	1110	6660	4530
OMNIFAL 300mg B/10 Gles	1110	0	0
OROKAL 200mg B/8 Cps.	1200	5610	2640

Cmax
6660

[Afficher les détails](#)

FIGURE 3.6 – Formulaire utilisateur "Affichage de l'ordonnancement"

3.4.5 Fonctionnement du programme

Cette section explique comment sont calculés les temps de traitement, la fonction objectif, et le déroulement de l'algorithme du recuit simulé.

- **Temps de traitement** : Les temps de traitement sont extraits de la feuille de calcul Excel nommée "Unité 2". Les données de cette feuille sont organisées de sorte que chaque ligne correspond à un produit et chaque colonne à une machine. Pour chaque produit, les temps de traitement sur différentes machines sont convertis en minutes. Le code lit ces temps de traitement et les stocks dans un tableau.
- **Calcul du makespan** : Le makespan est une étape cruciale dans notre programme, représentant le temps total nécessaire pour terminer l'ensemble des tâches.
 1. Les dates de début et de fin du traitement de chaque produit sur chaque machine sont initialisées et stockées dans des matrices.
 2. Pour le premier produit dans la séquence de solution, les dates de début et de fin sont initialisées pour la première machine ayant un temps de traitement non nul, en utilisant les temps de traitement stockés dans le tableau mentionné précédemment.
 3. Pour chaque produit suivant dans la séquence, les dates de début et de fin sont calculées en prenant en compte :
 - La date de début du produit suivant est le maximum entre "date de fin de produit précédent dans la machine précédente plus temps de changement" et "date de fin de produit précédent dans la machine elle-même plus temps de changement".
 - La date de fin du produit suivant est la date de début de ce produit suivant plus temps de traitement du produit dans la machine.
 4. Enfin, le makespan est déterminé comme le temps de fin maximum parmi toutes les machines et tous les produits.

```

Dim makespan As Double
' Initialisation de makespan
makespan = 0
For i = 1 To nbProduits
  For j = 1 To nbMachines
    If date_fin(i, j) > makespan Then
      makespan = date_fin(i, j)
    End If
  Next j
Next i
CalculerMakespan = makespan
End Function

```

FIGURE 3.7 – Code d’une partie de la fonction makespan

— **Algorithme du recuit simulé** : Voici les étapes principales du déroulement de cet algorithme :

1. Initialisation : Définir la température initiale, la température minimale, le facteur de refroidissement, et le nombre maximal d’itérations par température.
2. Génération de la solution initiale : Générer une solution initiale aléatoirement qui ordonnance les produits dans un ordre donné, nous avons choisi un codage de solution en nombre entier qui représente la séquence de produits à fabriquer (voir le tableau 3.2).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----

TABLE 3.2 – Codage de solution

3. Boucle Principale :

Tant que la température est supérieure à la température minimale, répéter :

Pour un nombre fixe d’itérations :

Générer une nouvelle solution en permutant deux produits choisis au hasard.

Calculer le makespan de cette nouvelle solution.

Calculer la différence de coût (delta) entre la nouvelle solution et la meilleure solution actuelle.

Si la nouvelle solution est meilleure, l’accepter. Sinon, l’accepter avec une certaine probabilité qui dépend de delta et de la température actuelle.

Réduire la température en utilisant le facteur de refroidissement.

4. Mise à jour des résultats : Mettre à jour la feuille de calcul avec les dates de début et de fin des traitements pour chaque produit dans la solution optimale trouvée.

```

' Recuit simulé

' Initialisation de la solution initiale
For i = 1 To 14
    currentSol(i) = i
Next i
For i = 1 To 14
    bestSol(i) = currentSol(i)
Next i

' Fonction objectif initiale
Dim bestObj As Double
bestObj = CalculerMakespan(currentSol, tempsTraitement)

' Boucle de recuit simulé
Do While temp > tempMin
    For iteration = 1 To maxIterations
        ' Générer une nouvelle solution en permutant deux produits
        For i = 1 To 14
            newSol(i) = currentSol(i)
        Next i
    
```

FIGURE 3.8 – Code d’une partie de l’algorithme du recuit simulé

Pour nous assurer de la fiabilité des résultats obtenus par notre application, nous avons décidé de diviser notre travail en deux parties distinctes :

- Première partie : Comparaison des résultats obtenus sans les temps de changement.

Nous allons d’abord utiliser l’application VBA sans introduire les temps de changement. Les résultats obtenus seront ensuite comparés à une simulation de l’atelier réalisée avec le logiciel LEKIN, qui ne prend également pas en compte les temps de changement. Cette comparaison permettra de valider la précision de notre application dans des conditions simplifiées.

- Deuxième partie : Comparaison des résultats en considérant les temps de changement.

Dans cette partie, nous allons utiliser l’application VBA en intégrant les temps de changement. Les résultats obtenus seront comparés aux résultats d’ordonnancement de l’entreprise, lesquels sont calculés à partir de formules Excel. Cette comparaison permettra de valider notre application dans des conditions réelles, en prenant en compte les temps de changement.

En procédant de cette manière, nous nous assurons que notre application est fiable et que les résultats obtenus sont conformes aux attentes, aussi bien dans un contexte simplifié qu’en conditions réelles.

3.5 Partie A

Dans le cadre de notre projet d'optimisation de l'ordonnancement de production, nous avons développé une application VBA pour l'ordonnancement des tâches de l'unité 2 au sein de SOPHAL. Afin de valider la fiabilité et la pertinence de notre application, nous avons décidé de mener une étude comparative.

En premier lieu, nous allons simuler l'atelier de l'unité 2 dans le logiciel LEKIN. Ensuite, nous comparerons ces résultats avec ceux de notre application sans tenir compte des temps de changement, en utilisant uniquement les temps de traitement des tâches.

Cette démarche permettra non seulement de renforcer la crédibilité de notre application, mais aussi de mettre en lumière d'éventuelles améliorations à apporter avant d'intégrer les temps de changement dans notre modèle.

3.5.1 Définition du logiciel LEKIN

LEKIN est un système d'ordonnancement polyvalent développé à la Stern School of Business de l'Université de New York (NYU), principalement conçu comme un outil pédagogique pour initier les étudiants à la théorie de l'ordonnancement et à ses applications. Le système a été créé avec la contribution d'étudiants de l'Université de Columbia, ce qui souligne sa nature collaborative et académique [1].

Le système LEKIN contient un certain nombre d'algorithmes de planification et d'heuristiques, il est conçu pour permettre à l'utilisateur de relier et de tester ses propres heuristiques et de comparer leurs performances avec les heuristiques et les algorithmes intégrés au système. Le système peut gérer un certain nombre de machines différentes en environnement, à savoir :

- Machine unique.
- Machines parallèles.
- Atelier de flux.
- Atelier de flux flexible.
- Atelier de travail.
- Atelier de flexible [24].

LEKIN fournit une plateforme robuste pour explorer divers problèmes d'ordonnancement, en particulier ceux rencontrés dans les environnements de job-shop et de job-shop flexible. Il permet aux utilisateurs de créer, de manipuler et d'analyser différents scénarios d'ordonnancement, ce qui en fait un outil inestimable pour l'apprentissage et la recherche. L'extensibilité du logiciel encourage les utilisateurs à développer et à intégrer leurs algorithmes, ce qui permet de mieux comprendre les complexités de l'ordonnancement et de développer des solutions personnalisées [24].

Le logiciel est conçu pour gérer plusieurs tâches, postes de travail et machines, offrant ainsi une vue d'ensemble des défis et des solutions en matière d'ordonnancement. Il permet de créer des simulations détaillées qui peuvent être utilisées pour optimiser les processus de fabrication, réduire les temps d'arrêt et améliorer l'efficacité globale.

3.5.2 Simulation de l'unité 2 sur le logiciel LEKIN

Dans notre cas, le logiciel a été utilisé pour modéliser le processus de production de l'unité 2 au sein de SOPHAL spécialisée dans la fabrication de comprimés, de gélules et de suspensions buvables. En entrant les temps de traitement et les séquences nécessaires pour chaque produit, LEKIN a facilité la visualisation du flux de travail et l'identification des goulets d'étranglement potentiels.

1. Conversion des Temps de Traitement pour l'Application LEKIN

Lors de l'utilisation du logiciel LEKIN, nous avons rencontré une contrainte technique importante, il ne permet pas d'entrer des valeurs de temps de traitement supérieures à trois chiffres. Étant donné que les temps de traitement dans notre cas sont initialement en heures et peuvent dépasser cette limite (par exemple, 2100 minutes, soit 35 heures), il était nécessaire de trouver une solution pour normaliser ces valeurs afin qu'elles soient acceptées par LEKIN tout en maintenant une proportionnalité correcte.

Processus de Conversion : Pour résoudre cette limitation, nous avons adopté une méthode de conversion des temps de traitement. Voici les étapes détaillées de ce processus :

(a) Conversion Initiale en Minutes :

Les temps de traitement initialement fournis en heures ont été convertis en minutes pour une précision plus fine. Cependant, certains de ces temps convertis dépassaient toujours les trois chiffres. Par exemple, 35 heures ont été converties en 2100 minutes.

Étant donné que LEKIN accepte un maximum de 999 minutes, nous avons dû redimensionner nos valeurs pour qu'elles restent dans cette limite.

(b) Échelle de Conversion :

Pour effectuer cette conversion, nous avons établi une échelle proportionnelle. Nous avons pris la valeur maximale admissible par LEKIN (999 minutes) et l'avons rapportée à notre valeur maximale initiale (2100 minutes). La formule de conversion utilisée est la suivante :

$$X = \left(\frac{\text{Heures en minute} \times 999}{2100} \right)$$

où X est le temps de traitement redimensionné.

(c) Application de la Conversion : En appliquant cette méthode, nous avons pu transformer tous les temps de traitement en valeurs comprises entre 0 et 999. Voici un exemple de conversion illustré :

Temps initial en minutes : 2100 minutes (35 heures) Temps redimensionné : 999 minutes Cette conversion a été appliquée systématiquement à tous les temps de traitement pour garantir une compatibilité avec LEKIN tout en maintenant la proportionnalité des temps relatifs de traitement entre les différentes tâches.

Présentation des temps de traitement convertis : Pour illustrer ce processus, nous fournissons une capture d'écran des temps de traitement initiaux en minutes, l'échelle de conversion utilisée, et enfin, le tableau des temps de traitement convertis :

Temps de Traitement Initiaux (en minutes) :

Excel spreadsheet showing production data for 'UNITE 2'. The main table is divided into 'FABRICATION' and 'CONDITIONNEMENT' sections. It lists various products and their processing times in minutes across multiple columns.

UNITE 2		FABRICATION										CONDITIONNEMENT					Somme des heures
DESIGNATION PRODUIT	Taille de lot	PESEE DS 2400 ET BALANCE INDUSTRIELLE LIOCCSC LP 75M7	GRANULATEUR GANSONS HSM6 (MELANGEUR) GANSONS BR60	COMPRIMEUSE GYLONE PG-2E	COMPRIMEUSE ROMACO KILLIAN DES-PRIME	COMPRIMEUSE SE HANJUN G2P-2E	ENROBEUSE GANSONS GAC 100	REMPLISSAG E PSB ROMAC7	REMPLISSAG E GELULE ACS PAMAF30	BLISTEREUSE EN LIGNE MACHPEP 301PPA	BLISTEREUSE HORS LIGNE ELMACH 301PPA	C S (COMPRIMEE) EN LIGNE	C S (COMPRIMEE) HORS LIGNE	C S PSB			
CEORICAL 16 BFD Cps	12 500	1 300	1 300	7 000	5 300	4 000	7 000	5 000	5 000	14 000	14 000	5 000	5 000	5 000	29 000		
LEONAL SUPHAL 16 BFD C	12 000	1 300	1 300	7 000	5 300	4 000	7 000	5 000	5 000	14 000	14 000	5 000	5 000	5 000	22 300		
OROKAL 500mg H88 Cps	75 000	1 300	2 000	7 000	16 000	14 000	7 000	7 000	35 000	14 000	7 000	35 000	35 000	35 000	73 300		
ZINE TAL 500mg CP F14	35 74	1 300	1 300	7 000	7 000	7 000	7 000	30 000	14 000	14 000	23 000	14 000	14 000	14 000	58 000		
ZINE TAL 500mg CP F14	17 957	1 300	1 300	7 000	7 000	7 000	7 000	30 000	14 000	14 000	23 000	14 000	14 000	14 000	58 000		
CEORICAL 500 mg BFD Cles	12 000	1 300	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	14 000	14 000	14 000	28 000	14 000	14 000	14 000	59 300		
OROKAL 300mg B88 Cles	22 000	1 300	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	8 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	8 000		
OROKAL 400mg B88 Cles	10 000	1 300	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	300	300	300	300	300	300	300	43 300		
LEONAL 500mg F1 100m	0 000	2 000	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	14 000		
LEONAL 15 mg/50ml F1 100m	0 000	2 000	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	14 000		
OROKAL 100mg/50ml F1 40m	20 000	2 000	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	14 000	14 000	14 000	14 000	14 000	14 000	14 000	37 000		
OROKAL 40 mg/50ml F1 40m	20 000	2 000	2 000	7 000	7 000	7 000	7 000	14 000	14 000	14 000	14 000	14 000	14 000	14 000	37 000		
LEONAL 500 MG CP BFD	20 000	1 300	2 000	8 000	7 000	7 000	7 000	14 000	14 000	14 000	28 000	14 000	14 000	14 000	65 300		

Conversion scale: 1h --->60
x=(heure*60)/1

FIGURE 3.9 – Temps de Traitement en minutes

Échelle de Conversion :

CONDITIONNEMENT				Somme des heures
BLISTEREUSE HORS LIGNE ELMACH 3010PPA	C S (COMPRIMEE/ GELULE) EN LIGNE	C S (COMPRIMEE/ GELULE) HORS LIGNE	C S PSB	
	1260			1260
	1740			1740
	1680			1680
				480
	720			960
			300	300
			300	300
			840	840
			840	840
	1680			1680
L'echelle de conversion		2100--->999		2100
		x=(heure*999)/2100		

FIGURE 3.10 – Échelle de Conversion

Temps de Traitement Convertis :

FABRICATION										CONDITIONNEMENT					Somme temps-taritem
PESEE DS 2400 ET BALANCE INDUSTRIELLE LIOCCSC LP 75M7	GRANULATEUR GANSONS HSM6 (MELANGEUR) GANSONS BR60	COMPRIMEUSE GYLONE PG-2E	COMPRIMEUSE ROMACO KILLIAN DES-PRIME	COMPRIMEUSE SE HANJUN G2P-2E	ENROBEUSE GANSONS GAC 100	REMPLISSAG E PSB ROMAC7	REMPLISSAG E GELULE ACS PAMAF30	BLISTEREUSE EN LIGNE MACHPEP 301PPA	BLISTEREUSE HORS LIGNE ELMACH 301PPA	C S (COMPRIMEE) EN LIGNE	C S (COMPRIMEE) HORS LIGNE	C S PSB			
42	42	0	199	0	0	0	0	171	0	371	0	0	827		
42	42	0	199	0	114	0	0	142	0	142	0	0	842		
42	57	0	399	199	0	0	0	399	0	999	0	0	2097		
42	42	0	496	0	199	0	0	999	0	999	0	0	1940		
42	42	0	199	0	199	0	0	599	0	599	0	0	1684		
42	57	0	0	0	0	0	285	399	0	827	0	0	1612		
42	57	0	0	0	0	0	399	399	0	799	0	0	1698		
42	57	0	0	0	0	0	225	0	0	0	0	0	0		
42	57	0	0	0	0	0	456	342	0	342	0	0	1241		
57	57	0	0	0	0	142	0	0	0	0	0	0	399		
57	57	0	0	0	0	142	0	0	0	0	0	0	142		
57	199	0	0	0	0	399	0	0	0	0	0	0	399		
57	199	0	0	0	0	399	0	0	0	0	0	0	1056		
42	199	228	0	0	199	0	0	399	0	799	0	0	1865		

FIGURE 3.11 – Temps de Traitement Convertis

Ces tableaux démontrent comment les valeurs ont été ajustées pour correspondre aux limitations de l'application LEKIN tout en conservant l'intégrité des données de traitement.

2. Procédure de simulation

Configuration des Machines dans LEKIN : Pour commencer à utiliser LEKIN, nous avons configuré les différentes machines présentes dans l'unité de production.

La création des Machines se fait sous l'onglet 'Machine Park' Dans LEKIN, nous avons ajouté toutes les machines utilisées dans le processus de production. Chaque machine a été configurée avec son ID unique et sa capacité de traitement. Par exemple, pour la machine de compression, nous avons créé des entrées distinctes pour "COMPRESSION GYLONGLI", "COMPRESSION KILLIAN", et "COMPRESSION HANLIN".

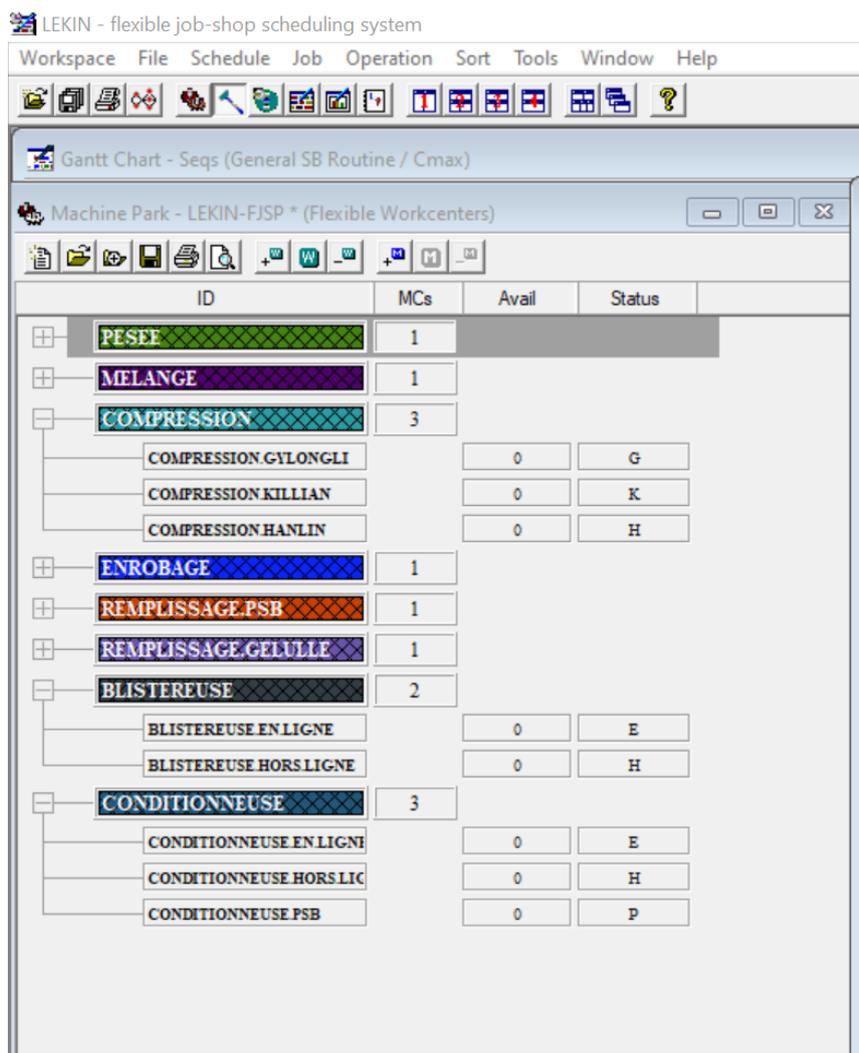


FIGURE 3.12 – Configuration des Machines dans LEKIN

Insertion des Produits (Jobs) et leur routage : Après avoir configuré les machines, nous avons inséré les différents produits (jobs) à ordonnancer. Pour chaque produit, nous avons spécifié les machines nécessaires et les temps de traitement. L'ajout des Jobs se fait sous l'onglet 'Job Pool', nous avons ajouté les différents produits avec leurs caractéristiques :

- ID du Produit : Chaque produit a un identifiant unique comme CEDROXAL 1G, LEXINAL 1G, etc.
- Séquence des Opérations : Pour chaque produit, nous avons défini la séquence des opérations, c'est-à-dire quelles machines seront utilisées et dans quel ordre.

- Temps de Traitement : Pour chaque étape, nous avons spécifié le temps de traitement nécessaire. Par exemple, pour CEDROXAL 1G, la séquence inclut MÉLANGE → COMPRESSION → ENROBAGE → CONDITIONNEUSE.

ID	Wght	Fls	Due	Prtm.	Stat.	Bgn	End	T	wT
CEDROXAL 1G	1	0	0	825		240	1623	1623	1623
LEXIAL 1G	1	0	0	638		141	809	809	809
OROKAL 200mg	1	0	0	2095		324	2779	2779	2779
ZINETAL 250mg	1	0	0	1937		465	3003	3003	3003
ZINETAL 500mg	1	0	0	1680		507	3235	3235	3235
CLORAFAL 500 mg	1	0	0	1610		282	2523	2523	2523
LEXINAL 500mg Gles	1	0	0	1696		0	1696	1696	1696
OROKAL 400mg B/06 Gle	1	0	0	1239		42	1638	1638	1638
LEXINAL 250mg/5ml fl.10	1	0	0	398		549	1780	1780	1780
LEXINAL 125 mg/5ml fl.10	1	0	0	398		84	497	497	497
OROKAL 100mg/5ml fl.40	1	0	0	1054		183	1252	1252	1252
OROKAL 40 mg/5ml fl.40	1	0	0	1054		408	2022	2022	2022
LEXINAL 500 MG CP B/12	1	0	0	1866		366	2836	2836	2836

FIGURE 3.13 – Insertion des Jobs et Routage

Pour exécuter la simulation, nous avons choisi l'heuristique "General SB Routine ". Cette heuristique est conçue pour résoudre des problèmes d'ordonnancement complexes, notamment les ateliers à cheminement multiple (job shop). Elle combine plusieurs heuristiques pour améliorer les solutions, elle est basée sur la politique SPT (Shortest Processing Time) attribuant la priorité à l'opération qui a le temps opératoire le plus court, de plus elle utilise l'heuristique LPT (Longest Processing Time) pour gérer les machines avec des temps opératoires plus longs[14].

Analyse des Résultats avec LEKIN

Une fois les données entrées, nous avons lancé la simulation dans LEKIN pour générer le diagramme de Gantt et d'autres analyses de performance :

- Diagramme de Gantt : Ce diagramme montre l'ordonnancement des différentes tâches sur les machines. Chaque barre colorée représente une tâche spécifique avec ses temps de début et de fin.

- Performance Globale : LEKIN fournit des métriques de performance comme le Makespan (temps total de production), la Tardiness (retard total), et le nombre de jobs en retard.

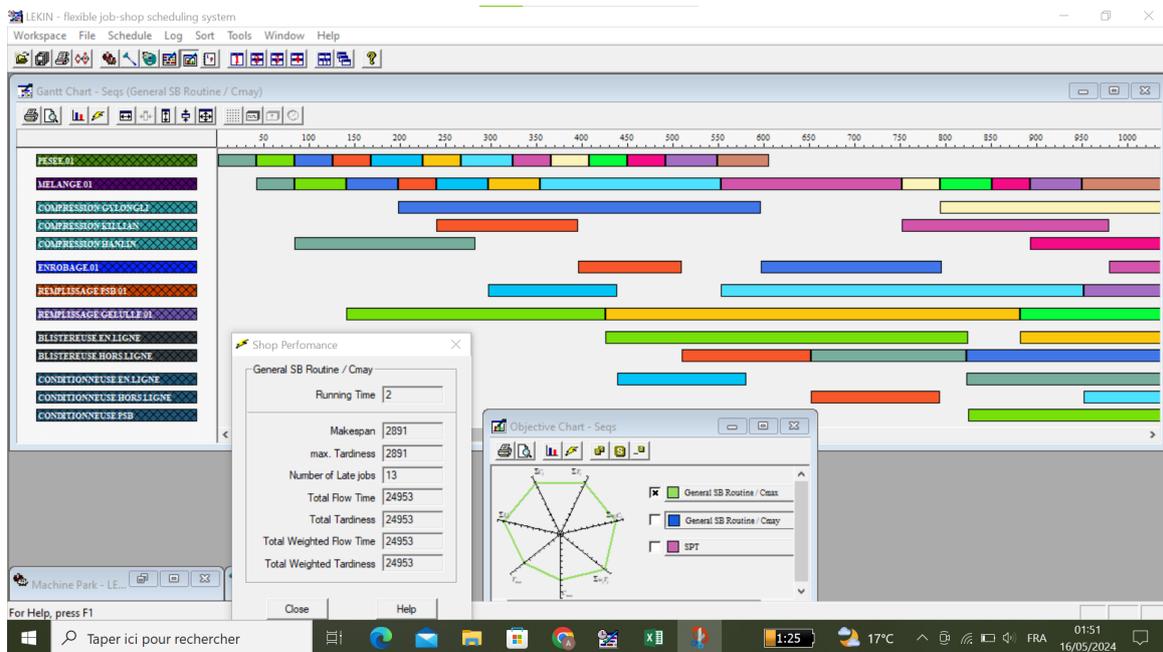


FIGURE 3.14 – Analyse des résultats sur LEKIN

Les résultats obtenus dans LEKIN sont initialement basés sur les valeurs converties, en raison de la limitation du logiciel à traiter des valeurs ne dépassant pas 999. Pour interpréter ces résultats en temps effectif, nous appliquons une conversion inverse afin de les ramener à leur échelle originale.

Voici comment nous interprétons les résultats de LEKIN :

Makespan : Le makespan calculé par LEKIN est de 2891. Pour obtenir la valeur réelle, nous utilisons la formule de reconversion :

$$C_{\max} = \left(\frac{2891 \times 2100}{999} \right) = 6078 \text{ minutes}$$

Ainsi, le makespan réel est de 6078 minutes. Cette mesure va nous permettre de comparer directement la performance du système avec d'autres configurations ou approches présentes dans notre application.

Cette simulation nous servira à valider les résultats de notre application VBA et cibler les améliorations nécessaires avant d'intégrer les temps de changement dans notre modèle.

-
- première machine, qui est la pesée.
 - **Temps de traitement total (Colonne Q)** : Cette colonne affiche le temps total de traitement pour chaque produit. Ce temps est crucial pour évaluer l'efficacité du processus de production. Il est calculé en additionnant les temps de traitement du produit sur chaque machine.
 - **Date de fin globale (Colonne R)** : La date à laquelle le produit a terminé tous ses traitements est indiquée dans cette colonne, c'est-à-dire le temps de fin dans la dernière machine.
 - **Temps d'attente (Colonne S)** : Le temps que chaque produit passe en attente entre les machines est répertorié ici. Il est calculé comme la différence entre la date de fin du produit dans la dernière machine, c'est-à-dire la date de fin globale et la somme des temps de traitement du produit sur toutes les machines, c'est-à-dire temps de traitement total.
 - **Le Makespan " C_{\max} "** : représente le temps total nécessaire pour compléter l'ensemble des tâches. Il est affiché en rouge en bas du tableau. Dans notre programme, le Makespan est calculé comme étant le temps de fin maximum parmi toutes les machines et tous les produits. Après l'exécution du recuit simulé, le résultat optimal obtenu est de 6 660 minutes. Cette valeur indique le temps total écoulé depuis le début du traitement du premier produit sur la première machine jusqu'à la fin du traitement du dernier produit sur la dernière machine.

3.5.4 Comparaison des résultats

Pour évaluer l'efficacité de notre application VBA utilisant l'algorithme du recuit simulé, nous avons comparé les résultats obtenus avec ceux de LEKIN, qui utilise l'algorithme "General SB Routine". Cette comparaison se concentre principalement sur le makespan.

1. Résultats Obtenus :

— LEKIN

Algorithme : General SB Routine

Makespan : 2891 minutes (temps converti : 6078 minutes)

— Application VBA

Algorithme : Recuit Simulé

Makespan : 6 660 minutes

2. Calcul du Pourcentage de Différence :

$$\text{Pourcentage de Différence} = \left| \frac{\text{Makespan}_{\text{VBA}} - \text{Makespan}_{\text{LEKIN}}}{\text{Makespan}_{\text{VBA}}} \right| \times 100 \quad (3.1)$$

Le pourcentage de différence calculé est d'environ 8%. Cela indique que le makespan obtenu par notre application VBA est environ 8% plus élevé que celui obtenu par LEKIN.

3. Interprétation :

L'objectif de cette comparaison consiste à voir la performance de la métaheuristique proposée qui sera ensuite utilisé pour la résolution du même problème en prenant en considération les temps de changement. Notons que le logiciel LEKIN utilise une heuristique appelée "General SB Routine" pour la résolution de ce problème. Les résultats obtenus sont satisfaisants puisque l'algorithme du recuit simulé ne garantit pas l'optimalité et donne une solution proche de l'optimum.

3.6 Partie B

Dans la Partie B de notre étude, nous allons explorer les améliorations apportées à notre application VBA d'ordonnement des produits en incluant les temps de changement. Après avoir établi la crédibilité de notre application sans temps de changement dans la Partie A, cette section se concentre sur l'intégration des contraintes de nettoyage et des quantités de lot à produire. L'objectif est de montrer l'impact des temps de changement sur l'ordonnement et la production, et de valider l'efficacité de l'application améliorée.

3.6.1 Données considérées

Dans cette partie B, nous allons expliquer les ajouts que nous avons apportés au modèle initial (voir Partie A). Ces ajouts incluent :

- Le calcul du nombre de lots à produire, tant sur une base annuelle que mensuelle, les calculs sont faits à partir d'un plan de production prévisionnel détaillant les différents produits et leurs quantités.

Produit	Volume annuel	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
CEDROXAL 1G B/12 Cps.	180 000	9 941	17 629	12 427	13 246	16 733	15 219	11 264	15 619	14 237	19 160	19 317	15 209
LEXINAL SOPHALIG B/12 Cps.	3 500 000	132 486	303 971	240 807	227 368	294 165	245 914	248 345	254 234	399 980	453 130	417 980	281 621
OROKAL 200mg B/8 Cps.	500 000	16 055	47 582	42 364	39 026	50 576	47 979	39 064	35 477	36 466	46 371	52 566	46 475
ZINETAL 250mg CP B/14	350 000	27 804	40 673	28 443	24 433	34 777	17 174	14 512	24 427	27 620	29 900	44 659	35 578
ZINETAL 500mg CP B/14	350 000	27 517	42 273	36 643	21 230	36 076	19 927	18 110	23 094	21 758	26 292	41 465	35 615
CLORAFAL 500 mg B/16 Gles	100 000	6 246	8 460	5 573	9 161	7 902	5 109	4 517	7 439	12 065	12 622	11 508	9 398
LEXINAL 500mg B/20 Gles	300 000	17 256	25 109	17 753	16 323	23 492	19 487	15 877	32 788	37 953	41 415	34 052	18 496
OMNIFAL 300mg B/10 Gles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OROKAL 400mg B/06 Gles	6 000	1 106	270	488	245	256	425	835	505	356	380	728	405
LEXINAL 250mg/5ml fl.100ml.	25 000	2 425	1 418	1 924	1 847	2 174	2 064	2 163	1 823	2 165	2 503	2 376	2 117
LEXINAL125 mg/5ml fl.100ml	10 000	718	916	770	969	686	808	1 182	480	1 153	829	657	831
OROKAL 100mg/5ml fl.40ml	450 000	25 768	38 633	32 100	31 283	31 225	46 280	23 275	27 233	33 844	49 388	57 842	53 129
OROKAL 40 mg/5ml fl.40ml	250 000	10 467	21 542	16 427	24 399	14 263	12 958	27 765	13 647	27 468	24 988	25 420	30 655
LEXINAL 500 MG CP B/12	5 000	384	397	380	306	483	301	339	406	539	492	569	402

FIGURE 3.16 – Le plan de production prévisionnel par mois

- Les contraintes de nettoyage :
 - Un nettoyage est appliqué après chaque groupe de 10 lots de produits.
 - Un nettoyage est appliqué à chaque changement de produit, nécessitant des ajustements dans les séquences de production.
- L'entreprise travaille avec 3 shifts.

3.6.2 Améliorations apporter à l'interface utilisateur

Userform "Affichage des produits" :

Dans cette partie B, nous avons modifié le formulaire utilisateur "Affichage des produits" en ajoutant un bouton permettant de sélectionner un mois précis.

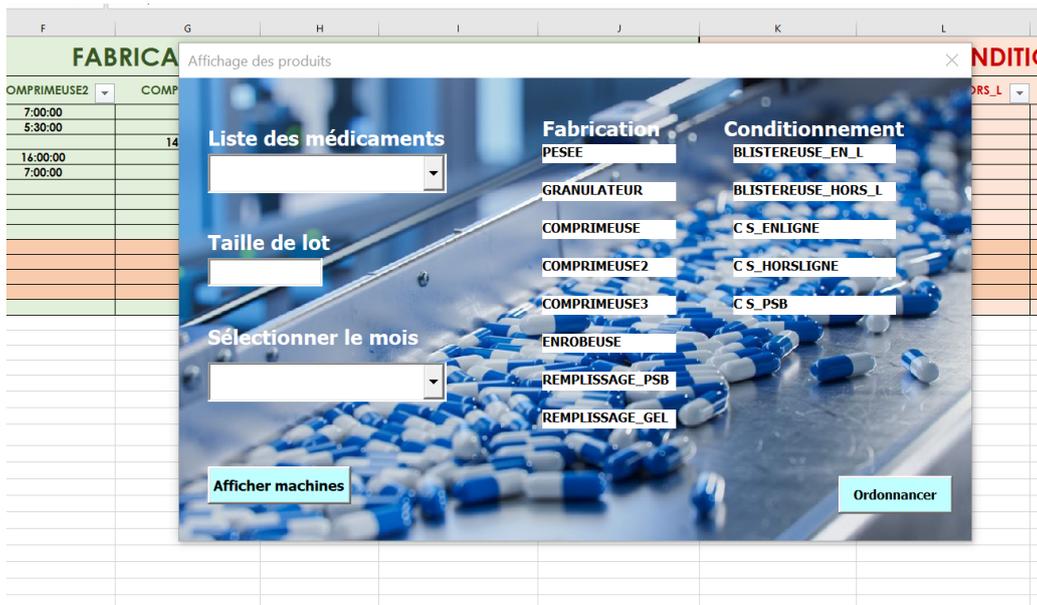


FIGURE 3.17 – formulaire utilisateur "Affichage des produits"

Lorsque ce bouton est cliqué, une liste des mois apparaît, permettant à l'utilisateur de choisir un mois spécifique.

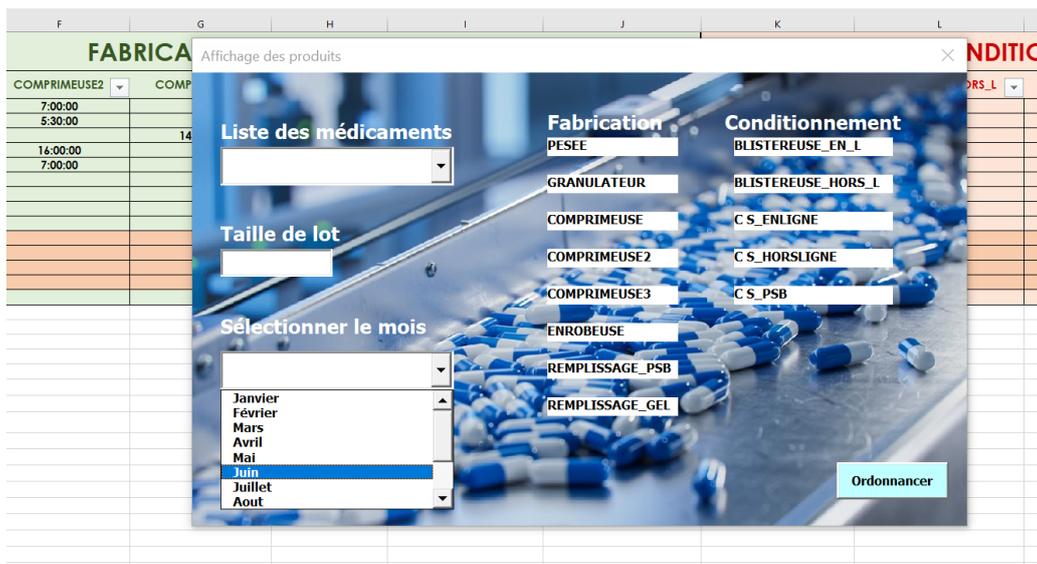


FIGURE 3.18 – La liste des mois

Après la sélection du mois, les quantités mensuelles à produire dans la feuille "Unité2" voir (3.19) sont ajustées en fonction des données de la feuille "sales plan INUTE 2" (voir 3.16).

O	P	Q	R	S
	Qte annuelle à produire		Qte mensuelle à produire	
C S_PSB	Demande annuelle	Nbr de lots annuel	Demande mensuelle Juin	Nbr de lots Juin
	180 000	14,4	15 219	2
	3 500 000	289,6631631	245 914	21
	500 000	6,666666667	47 979	1
	350 000	9,800078401	17 174	1
	350 000	19,6001568	19 927	2
	100 000	5,066626134	5 109	1
	300 000	20	19 487	2
	0	0	0	0
	6 000	0,6	425	1
5:00:00	2 000 000	250	2 064	1
5:00:00	500 000	62,5	808	1
14:00:00	450 000	22,5	46 280	3
14:00:00	250 000	12,5	12 958	1
	200 000	10	301	1

FIGURE 3.19 – Les quantités mensuelles à produire

Dans le cas où un utilisateur appuie sur le bouton "Ordonnancer" sans sélectionner de mois, un message "Veuillez sélectionner le mois" s'affichera (voir 3.20) et le programme ne s'exécutera pas.

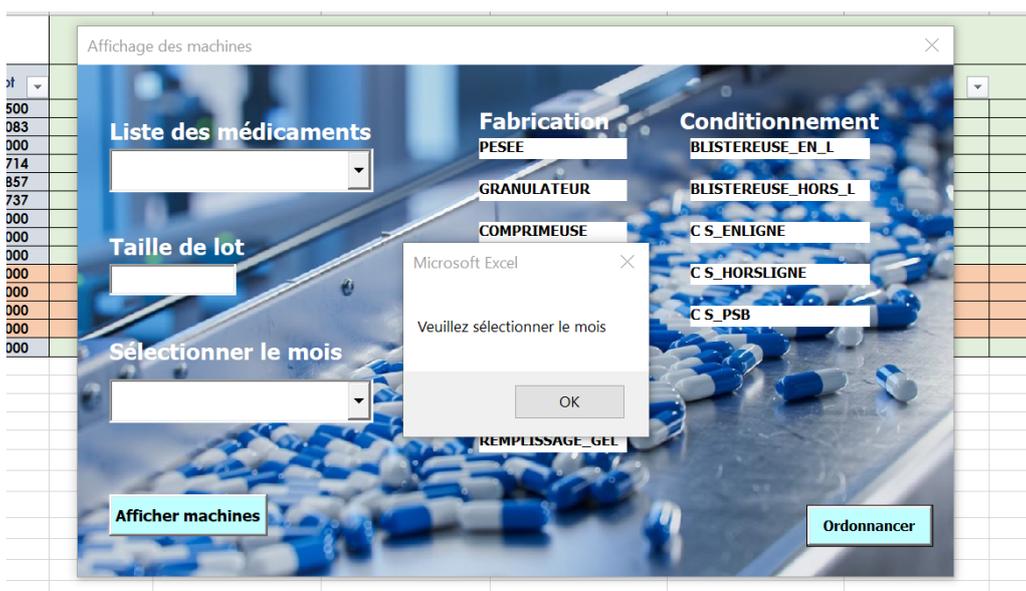


FIGURE 3.20 – Message d'erreur

Userform "Affichage de l'Ordonnancement" :

En cliquant sur le bouton "ordonnancer", le formulaire utilisateur "affichage de l'ordonnancement" s'affiche. Ce formulaire présente de manière générale les produits ordonnés, leurs dates de début et de fin, ainsi que le temps d'attente et le C_{max}

Séquence	Date début	Date fin	Temps d'attente
<input type="radio"/> CEDROXAL 1G B/12 Cps	0	1740	0
<input checked="" type="radio"/> OROKAL 400mg B/06 Gles	180	3120	510
<input type="radio"/> ZINETAL 500mg CP B/14	360	5520	1980
<input type="radio"/> LEXINAL SOPHAL1G B/12 Cps.	540	7860	6510
<input type="radio"/> OROKAL 200mg B/8 Cps.	900	6750	3780
<input type="radio"/> OROKAL 100mg/5ml fl.40ml	1080	5640	3420
<input type="radio"/> CLORAFAL 500 mg B/16 Gles	1290	8760	6810
<input type="radio"/> LEXINAL 250mg/5ml fl 100ml.	1470	6180	5340
<input type="radio"/> OMNIFAL 300mg B/10 Gles	1470	0	0
<input type="radio"/> LEXINAL 500 MG CP B/12	1680	7860	5370
<input type="radio"/> OROKAL 40 mg/5ml fl.40ml	1860	8400	6180
<input type="radio"/> ZINETAL 250mg CP B/14	2070	9780	7140
<input type="radio"/> LEXINAL 500mg B/20 Gles	2250	9690	7560
<input type="radio"/> LEXINAL125 mg/5ml fl.100ml	2430	8940	8100

Cmax
9780

Afficher les détails

FIGURE 3.21 – Le formulaire utilisateur "affichage de l'ordonnancement"

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	Ordonnement Juin	Taille de lot	Poids	Mélange/Granulés	Comprimeuse GYLONGLI	Comprimeuse KILLIAN	Comprimeuse MANLIN	Ferboise	Remplissage PSB	Remplissage GELULLES	Blistèreuse EN-LIGNE	Blistèreuse BORS-LIGNE	Conditionneuse EN-LIGNE	Conditionneuse
2	CEDROXAL 1G B/12 Cps	12500	0	90	0	180	0	0	0	0	600	0	960	0
3			90	180	0	960	0	0	0	0	960	0	1260	0
4	OROKAL 400mg B/6 Gles	10000	180	600	0	0	0	0	0	720	1680	0	2400	0
5			270	720	0	0	0	0	0	1680	2400	0	3120	0
6	ZINETAL 500mg CP B/14	17857	360	1440	0	1200	0	1650	0	0	3600	0	4260	0
7			450	1200	0	1650	0	2070	0	0	4260	0	5220	0
8	LEXINAL SOPHALIG B/12 Cps.	12083	540	1800	0	2580	0	3870	0	0	4860	0	6360	0
9			610	2580	0	3870	0	4990	0	0	6360	0	7860	0
10	OROKAL 300mg B/8 Cps.	75000	900	3000	0	0	3120	4800	0	0	0	5250	0	0
11			990	3120	0	0	3960	5250	0	0	0	6090	0	0
12	OROKAL 100mg/5ml fl.40ml	20000	1080	3540	0	0	0	0	3960	0	0	0	0	0
13			1200	3960	0	0	0	0	4800	0	0	0	0	0
14	CLORAFAL 500 mg B/16 Gles	19737	1380	4380	0	0	0	0	0	4500	6960	0	8460	0
15			1380	4500	0	0	0	0	0	5100	7800	0	8760	0
16	LEXINAL 250mg/5ml fl.100ml	8000	1470	4920	0	0	0	0	5400	0	0	0	0	0
17			1590	5040	0	0	0	0	5700	0	0	0	0	0
18	OMINFAL 300mg B/10 Gles	22000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	LEXINAL 500 MG CP B/12	20000	1680	5460	5880	0	0	6360	0	0	0	6780	0	76
21			1770	5880	6360	0	0	6780	0	0	0	7620	0	78
22	OROKAL 40 mg/5ml fl.40ml	20000	1860	6300	0	0	0	0	6720	0	0	0	0	0
23			1980	6720	0	0	0	0	7560	0	0	0	0	0
24	ZINETAL 250mg CP B/14	35714	2070	7140	0	7230	0	8190	0	0	8610	0	9360	0
25			2160	7230	0	8190	0	8610	0	0	9270	0	9780	0
26	LEXINAL 125 mg/5ml fl.100ml	8000	2250	7650	0	0	0	0	0	7770	0	8610	0	0
27			2340	7770	0	0	0	0	0	7770	0	8610	0	94
28	LEXINAL 500mg B/20 Gles	15000	2340	7770	0	0	0	0	0	8610	0	9450	0	96
29			2430	7770	0	0	0	0	0	8610	0	9450	0	0
30	LEXINAL125 mg/5ml fl.100ml	8000	2430	8190	0	0	0	0	8310	0	0	0	0	0
31			2550	8310	0	0	0	0	8610	0	0	0	0	0
32	Temps de changement		1080	5040	0	1440	0	960	1800	1200	3000	1200	3000	12

FIGURE 3.23 – Séquence obtenue.

Temps de changement par machine (Ligne 30) : Une ligne distincte pour le temps de changement a été introduite.

Ce temps de changement est calculé en multipliant le nombre de produits fabriqués dans une machine donnée, moins un, par le temps de changement spécifique à cette machine. Comme montre l'équation suivante :

$$T = (N - 1) \times t_c \quad (3.2)$$

où :

N est le nombre de produits fabriqués dans une machine donnée,

t_c est le temps de changement spécifique à cette machine.

Par exemple, la quatrième machine qui est comprimeuse KILLIAN (colonne F) traite 4 produits, le temps de changement est de $(4 - 1) \times 480 = 1440$ minutes.

26	LEXINAL 500mg B/20 Gles	15000	2250	7650	0	0	0	0	0	7770	0	8610	0	0
27			2340	7770	0	0	0	0	0	8610	0	9450	0	0
28	LEXINAL125 mg/5ml fl.100ml	8000	2430	8190	0	0	0	0	8310	0	0	0	0	0
29			2550	8310	0	0	0	0	8610	0	0	0	0	0
30	Temps de changement		1080	5040	0	1440	0	960	1800	1200	3000	1200	3000	12

FIGURE 3.24 – Temps de changement par machine.

Nombre de lots annuel/mensuel (Colonnes T et U) : Deux nouvelles colonnes ont été ajoutées pour représenter respectivement le nombre de lots annuels et mensuels.

Le nombre de lots annuels est calculé en divisant la demande annuelle par la taille de lot du produit, arrondi à l'entier supérieur.

$$N_{\text{annuels}} = \left\lceil \frac{D_{\text{annuelle}}}{S} \right\rceil \quad (3.3)$$

où :

N_{annuels} est le nombre de lots annuels.

D_{annuelle} est la demande annuelle.

S est la taille de lot du produit.

De même, le nombre de lots mensuels est calculé en divisant la demande mensuelle (selon le mois sélectionné dans l'interface "affichage des machines") par la taille de lot du produit, arrondi à l'entier supérieur.

$$N_{\text{mensuels}} = \left\lceil \frac{D_{\text{mensuelle}}}{S} \right\rceil \quad (3.4)$$

où :

N_{mensuels} est le nombre de lots mensuels.

$D_{\text{mensuelle}}$ est la demande mensuelle (selon le mois sélectionné).

S est la taille de lot du produit.

M	N	O	P	Q	R	S	T	U		
EN-LIGNE	Conditionneuse	HORS-LIGNE	Conditionneuse	PSB	Date de début	Temps de traitement	Date de fin	Temps d'attente	Nbr de lots annuel	Nbr de lots mensuel
960	0	0	0	0	1740	1740	0	15	2	
740	0	0	0	0	180	2610	3120	510	1	1
400	0	0	0	0	360	3540	5520	1980	20	2
120	0	0	0	0	540	1350	7860	6510	290	21
860	0	0	0	0	900	2970	6750	3780	7	1
0	6090	0	0	0	1080	2220	5640	3420	23	3
0	6750	0	0	0	1290	1950	8760	6810	6	1
4460	0	0	5880	0	1470	840	6180	5340	250	1
1760	0	0	6180	0	1470	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1680	2490	7860	5370	10	1
0	7620	0	0	0	1860	2220	8400	6180	13	1
0	7860	0	0	0	2070	2640	9780	7140	10	1
360	0	0	0	0	2250	2130	9690	7560	20	2
780	9450	0	0	0	2430	840	8940	8100	63	1
0	9690	0	0	0						
0	0	8640	0	0						
0	0	8940	0	0						
000	1200	720			Cmax	9780		Afficher les dates		

FIGURE 3.25 – le nombre de lots annuels et mensuels.

Temps de changement après chaque 10 lots (Colonne V) : En plus de ces ajustements, une nouvelle colonne pour le temps de changement a été ajoutée. Ce temps de changement est calculé en fonction du nombre total de lots produits divisé par 10, moins un, multiplié par le temps de changement des machines sur lesquelles le produit est exécuté.

$$T_{cl} = \left(\left\lceil \frac{N_{\text{lots}}}{10} \right\rceil - 1 \right) \times t_c \quad (3.5)$$

où :

T_{cl} est le temps de changement après chaque 10 lots,

N_{lots} est le nombre total de lots produits,

t_c est le temps de changement des machines sur lesquelles le produit est exécuté.

Par exemple, dans la ligne 8, le produit "LEXINAL SOPHAL 1G" est produit dans les machines 1, 2, 4, 6, 9, et 11 avec un total de 21 lots. En appliquant la règle de nettoyage après chaque 10 lots, nous obtenons :

$$\frac{21}{10} = 2.1$$

Ce qui, arrondi à l'entier supérieur, donne 3, puis en soustrayant 1, nous arrivons à 2 campagnes de nettoyage.

Le calcul des temps de nettoyage se fait comme suit :

- 90 minutes pour la première machine
- 420 minutes pour la deuxième machine
- 480 minutes pour la quatrième machine

- 240 minutes pour la sixième machine
- 600 minutes pour la neuvième machine
- 600 minutes pour la onzième machine

Ce qui donne un total de $90+420+480+240+600+600=2430$ minutes pour une seule campagne de nettoyage.

Pour deux campagnes de nettoyage, le temps total sera $2430 \times 2 = 4860$ minutes.

U	V
Nbr de lots mensuel	Temps de changement
2	0
1	0
2	0
21	4860
1	0
3	0
1	0
1	0
0	0
1	0
1	0
1	0
2	0
1	0

FIGURE 3.26 – Temps de changement après chaque 10 lots.

Conversion en Dates Réelles : En cliquant sur le bouton "afficher les dates", les résultats de la feuille "résultats" sont convertis en dates dans une autre feuille appelée "resultsDate"(voir).

C2				
01/06/2024 06:00:00				
	A	B	C	D
	Ordonnancement Juin	Taille de lot	Pesée	Mélange&Granulation
1				
2	CEDROXAL 1G B/12 Cps	12500	01/06/2024 06:00:00 01/06/2024 07:30:00	01/06/2024 07:30:00 01/06/2024 09:00:00
3				
4	OROKAL 400mg B/06 Gles	10000	01/06/2024 09:00:00 01/06/2024 10:30:00	01/06/2024 16:00:00 01/06/2024 18:00:00
5				
6	ZINETAL 500mg CP B/14	17857	01/06/2024 12:00:00 01/06/2024 13:30:00	02/06/2024 01:00:00 02/06/2024 02:30:00
7				
8	LEXINAL SOPHAL1G B/12 Cps.	12083	01/06/2024 15:00:00 01/06/2024 19:30:00	02/06/2024 09:30:00 03/06/2024 01:00:00
9				
10	OROKAL 200mg B/8 Cps.	75000	01/06/2024 21:00:00 01/06/2024 22:30:00	03/06/2024 08:00:00 03/06/2024 10:00:00
11				
12	OROKAL 100mg/5ml fl.40ml	20000	02/06/2024 00:00:00 02/06/2024 02:00:00	03/06/2024 17:00:00 04/06/2024 00:00:00
13				
14	CLORAFAL 500 mg B/16 Gles	19737	02/06/2024 03:30:00 02/06/2024 05:00:00	04/06/2024 07:00:00 04/06/2024 09:00:00
15				

FIGURE 3.29 – La date de référence en fonction du mois sélectionné.

Les colonnes de date de début et de fin, ainsi que le Cmax, sont également converties en dates réelles pour une meilleure lisibilité et compréhension.

08/06/2024 01:00:00			
O	P	Q	R
Ordonnancement PSB	Date de début	Temps de traitement	Date de fin
	01/06/2024 06:00	1740	02/06/2024 11:00
	01/06/2024 09:00	2610	03/06/2024 10:00
	01/06/2024 12:00	3540	05/06/2024 02:00
	01/06/2024 15:00	1350	06/06/2024 17:00
	01/06/2024 21:00	2970	05/06/2024 22:30
	02/06/2024 00:00	2220	05/06/2024 04:00
	02/06/2024 04:30	1950	07/06/2024 08:00
	02/06/2024 06:30	840	05/06/2024 13:00
	02/06/2024 06:30	0	01/06/2024 06:00
	02/06/2024 10:00	2490	06/06/2024 17:00
	02/06/2024 13:00	2220	07/06/2024 02:00
	02/06/2024 16:30	2640	08/06/2024 01:00
	02/06/2024 20:30	2130	08/06/2024 00:30
	02/06/2024 22:30	840	07/06/2024 11:00
720	Cmax	08/06/2024 01:00:00	

FIGURE 3.30 – Les dates de début, de fin et Cmax convertis en date.

Nombre de shift : Nous avons aussi introduit une nouvelle fonctionnalité permettant de spécifier le nombre de shifts "Nb Shift" dans la feuille "ResultDate".

Cette cellule permet à l'utilisateur de spécifier le nombre de shifts pour chaque période de production. En spécifiant ce nombre, l'utilisateur peut ajuster les horaires de production en fonction des disponibilités et des contraintes de l'usine. Cela permet une meilleure planification des ressources humaines et matérielles. Il est calculé de la manière suivante ($C_{max} / 60 / 8$)

Dans ce cas du mois de juin, nous avons obtenu 21 shifts (voir 3.31) de ce fait la valeur du C_{max} peut changer en fonction du nombre de shift décidé par l'entreprise, si l'entreprise travaille en deux shifts ou bien seulement un shift la valeur du C_{max} va automatiquement augmenter.

P	Q	R	S	T	U
Date de début	Temps de traitement	Date de fin	Temps d'attente	Nbr de lots annuel	Nbr de lots men
01/06/2024 06:00	1740	02/06/2024 11:00	0	15	2
01/06/2024 09:00	2610	03/06/2024 10:00	510	1	1
01/06/2024 12:00	3540	05/06/2024 02:00	1980	20	2
01/06/2024 15:00	1350	06/06/2024 17:00	6510	290	21
01/06/2024 21:00	2970	05/06/2024 22:30	3780	7	1
02/06/2024 00:00	2220	05/06/2024 04:00	3420	23	3
02/06/2024 04:30	1950	07/06/2024 08:00	6810	6	1
02/06/2024 06:30	840	05/06/2024 13:00	5340	250	1
02/06/2024 06:30	0	01/06/2024 06:00	0	0	0
02/06/2024 10:00	2490	06/06/2024 17:00	5370	10	1
02/06/2024 13:00	2220	07/06/2024 02:00	6180	13	1
02/06/2024 16:30	2640	08/06/2024 01:00	7140	10	1
02/06/2024 20:30	2130	08/06/2024 00:30	7560	20	2
02/06/2024 22:30	840	07/06/2024 11:00	8100	63	1
Cmax	08/06/2024 01:00:00		Nb shift	21	
Logout					

FIGURE 3.31 – Nombre de shift

3.6.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de démontrer l'efficacité et la pertinence de la solution développée pour optimiser les processus de production chez SOPHAL SPA. Nous avons détaillé l'implémentation de l'application VBA en utilisant l'algorithme du recuit simulé et montré comment elle optimise l'ordonnancement dans un environnement de type job shop.

Dans la première partie, nous avons utilisé l'application VBA sans prendre en compte les temps de changement et comparé les résultats obtenus à une simulation réalisée avec le logiciel LEKIN. Cette comparaison a validé la précision de notre application dans des conditions simplifiées, confirmant ainsi sa capacité à ordonnancer les tâches efficacement.

La deuxième partie a introduit les temps de changement et les quantités de produits, permettant ainsi d'analyser leur impact sur le processus de production. Les améliorations apportées à l'interface utilisateur, l'intégration des temps de changement, ainsi que la gestion des différents nombres de shifts ont démontré un ordonnancement plus réaliste et optimisée, mettant en évidence l'efficacité de notre solution.

Ces résultats illustrent la disposition de l'application VBA à répondre aux besoins spécifiques de SOPHAL et à surmonter les limitations des outils d'ordonnancement existants.

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a abordé les défis spécifiques rencontrés par SOPHAL SPA dans l'optimisation de ses processus de production, particulièrement dans son atelier de type job shop. Les outils d'ordonnancement existants n'étant pas adéquats, nous avons entrepris de développer une solution sur mesure pour répondre aux besoins uniques de l'entreprise.

Notre étude a commencé par un état des lieux détaillé de l'industrie pharmaceutique et du marché pharmaceutique en Algérie, suivi d'une présentation approfondie de SOPHAL et de ses opérations. Nous avons ensuite exploré les concepts théoriques et les méthodes d'ordonnancement pertinents, notamment les problèmes de type job shop et les algorithmes de résolution tels que le recuit simulé sur lequel on s'est basée pour faire l'optimisation de l'ordonnancement.

La solution qu'on a proposée est une application VBA développée spécifiquement pour SOPHAL, a été testée et validée à travers une série d'analyses comparatives. Dans un premier temps, nous avons comparé l'application VBA, sans prendre en compte les temps de changement, avec le logiciel LEKIN. Les résultats ont montré que notre application était capable de gérer efficacement les tâches de production dans des conditions simplifiées. Ensuite, en intégrant les temps de changement et les quantités de produits, ainsi que la gestion des différents shifts, nous avons démontré que notre solution permettrait un ordonnancement plus réaliste et optimisée.

Les résultats obtenus soulignent l'efficacité de notre solution, offrant à SOPHAL une meilleure gestion de l'ordonnancement et une optimisation de ses processus de production.

Bien que les résultats soient prometteurs, une mise en œuvre à grande échelle et une évaluation continue seront nécessaires pour assurer l'adaptation de l'application aux évolutions des besoins de l'entreprise. Cela peut être fait en ajoutant les contraintes de capacité de chaque machine ainsi qu'un bouton permettant de sélectionner le mode production.

En conclusion, ce mémoire contribue de manière significative à l'amélioration des processus de production chez SOPHAL, renforçant ainsi la compétitivité de l'entreprise sur le marché des médicaments génériques. Il ouvre également des perspectives intéressantes pour le développement futur de solutions d'ordonnancement personnalisées dans l'industrie pharmaceutique et au-delà.

Glossaire

Algorithmes : Suite d'instructions permettant de résoudre un problème ou de réaliser une tâche spécifique de manière systématique.

Atelier de type Job Shop : Unité de production où les produits suivent des parcours variés entre différentes machines en fonction des opérations nécessaires.

Comprimé : Forme pharmaceutique solide contenant un dosage précis de médicament destiné à être avalé.

Gélule : Capsule composée de gélatine contenant un médicament en poudre ou en liquide.

Ordonnancement : Processus de planification des tâches et des opérations dans le temps afin d'optimiser l'utilisation des ressources et minimiser les délais de production.

Recuit Simulé : Algorithme de recherche heuristique inspiré du processus de refroidissement des métaux, utilisé pour trouver des solutions optimales dans des problèmes complexes.

NP-difficile Classe de complexité des problèmes pour lesquels aucune solution rapide n'est connue (Non-deterministic Polynomial-time hard)

Officine : Le terme "officine" est utilisé pour désigner une pharmacie, c'est-à-dire un établissement où sont préparés et délivrés des médicaments sur prescription médicale. Le terme peut également être utilisé pour désigner une entreprise pharmaceutique.

IQVIA : IQVIA est le résultat de la fusion en 2016 de Quintiles, une organisation mondiale de recherche sous contrat de premier plan, et d'IMS Health, l'un des principaux fournisseurs de données et d'analyses de soins de santé. Le nom de l'entreprise moderne rend hommage aux organisations traditionnelles. IQVIA : I (IMS Health), Q (Quintiles) et VIA (en passant)

Bibliographie

- [1] Lekin® – flexible job-shop scheduling system, 2010.
- [2] Les classes d’ordonnancement, 2018.
- [3] Ordonnancement d’atelier, 2018.
- [4] Le marché pharmaceutique mondial par zone géographique, 2021.
- [5] Big pharma : qui sont les plus grands laboratoires ?, 2022.
- [6] le marché pharmaceutique, 2022.
- [7] Formation vba, 2024.
- [8] Visual basic pour applications (vba) : définition, utilisations et exemples, 2024.
- [9] Industrie pharmaceutique-définition, Octobre 2023.
- [10] A.KERRAR. Le secteur pharmaceutique en afrique , enjeux économiques actuels.
- [11] H. B. B. O. Boukef. *Sur l’ordonnancement d’ateliers job-shop flexibles et flow-shop en industries pharmaceutiques : optimisation par algorithmes génétiques et essais particuliers*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille ; École nationale d’ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2009.
- [12] J. Carlier, P. Chrétienne, J. Erschler, C. Hanen, P. Lopez, A. Munier, E. Pinson, M.-C. Portmann, C. Prins, C. Proust, et al. Les problèmes d’ordonnancement. *RAIRO-Operations Research*, 27(1) :77–150, 1993.
- [13] O. DJELOUAT and C. AHLOU. Le marché du médicament en algérie. *International Journal of Business & Economic Strategy (IJES)* Vol, pages 92–102, 2018.
- [14] E. Fradinata and Z. Kesuma. The comparison of optimum heuristic and deterministic scheduling rules for job shop scheduling in the manufacture. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 523, page 012069. IOP Publishing, 2019.
- [15] A. Frogerais. Histoire de l’industrie pharmaceutique en algérie. 2019.
- [16] L. GACHOUT, M.-A. DIAYE, and A. BENBRAIKA. Les médicaments generiques en algerie un marche en plein essor : Cas du groupe saidal.
- [17] A. Gorine. *Ordonnancement des systèmes flexibles avec contrainte de blocage*. PhD thesis, Université Paul Verlaine-Metz, 2011.
- [18] D. Gourc and S. Bougaret. L’industrie pharmaceutique : ses projets de développement, leurs caractéristiques et leur management. *La Cible–La Revue Francophone du Management de Projet*, (81) :p–4, 2000.
- [19] A. HADRI. *Contribution à la résolution des problèmes d’ordonnancement en temps réel dans un système de production de type Job Shop*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2022.
- [20] J. Kaabi-Harrath. *Contribution à l’ordonnancement des activités de maintenance dans les systèmes de production*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2004.
- [21] M. Larabi. *Le problème de job-shop avec transport : modélisation et optimisation*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2010.

-
- [22] P. Lopez. *Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 1991.
- [23] Y. Mati. *Les problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de production automatisés : Modèles, complexité et approches de résolution*. PhD thesis, Université Paul Verlaine-Metz, 2002.
- [24] L. Michael. *scheduling*. springer.
- [25] B. Nadira and B. Amina. L'industrie pharmaceutique en algérie—vecteur de croissance socioéconomique. *Al Moasher Journal for Economic Studies*, 1(4) :272–289, 2017.
- [26] M. Raffait. *Exportation de médicaments en Algérie : enjeux réglementaires et stratégiques d'un laboratoire exploitant basé en France*. PhD thesis, 2024.
- [27] D. Savourey. *Ordonnancement sur machines parallèles : minimiser la somme des coûts*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2006.
- [28] M. SOUIER. Algorithmes, modèles et principes de base d'ordonnancement de la production : Cours et exercices. 2019.
- [29] K. D. Tait. Chapitre 79. l'industrie pharmaceutique. *Encycl. Sécurité Santé Au Trav.[En ligne]*. Genève : Bureau Internationale du Travail, page 4838, 2002.
- [30] H. Toussaint. *Algorithmique rapide pour les problèmes de tournées et d'ordonnancement*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2010.
- [31] A. Yahyaoui. *Élaboration de nouveaux outils non conventionnels intelligents pour l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance : application au cas d'un job shop*. PhD thesis, Université de Tunis-ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE TUNIS, 2011.
- [32] M. B. Y. R. M. Yasser. *Étude, modélisation et implémentation d'une solution d'ordonnancement pour la gestion de la production au sein de BIOPHARM*. PhD thesis, ENP, 2021.
- [33] L. ZIANI. L'industrie du médicament en algérie : Etat des lieux et contraintes. *Revue Abaad Iktissadia Vol*, 11(01) :419–443, 2021.
- [34] L. ZINAI and O. D. d. T. ANNAD. *Résolution d'un problème d'ordonnancement des tâches dans une unité de production cas BIOPHARM*. PhD thesis, 2023.
-

Résumé

Ce mémoire traite des défis de l'ordonnancement de la production dans l'atelier de l'unité 2 de SOPHAL SPA, une entreprise pharmaceutique algérienne. Les limites des outils existants ont conduit au développement d'une application VBA personnalisée basée sur un algorithme de recuit simulé afin d'optimiser les processus de production. La solution propose un ordonnancement optimal en tenant compte des diverses contraintes, notamment, elle est théoriquement solide et pratiquement applicable, ce qui permet de répondre aux défis spécifiques de l'ordonnancement dans un contexte de production complexe.

Mots clés :

Ordonnancement, Production pharmaceutique, SOPHAL SPA, Application VBA, Recuit simulé, Optimisation des processus, Job shop, Lekin.

Abstract

This dissertation deals with the challenges of production scheduling in the workshop of Unit 2 of SOPHAL SPA, an Algerian pharmaceutical company. The limitations of existing tools led to the development of a customized VBA application based on a simulated annealing algorithm to optimize production processes. The solution proposes optimal scheduling taking into account various constraints, in particular, it is theoretically sound and practically applicable, thus addressing the specific challenges of scheduling in a complex production context.

Key words:

Scheduling, Pharmaceutical production, SOPHAL SPA, VBA application, Simulated annealing, Process optimization, Job shop, Lekin.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تحديات جدولة الإنتاج في ورشة عمل الوحدة 2 في شركة صوفال، وهي شركة أدوية جزائرية. أدت محدودية الأدوات الحالية إلى تطوير تطبيق VBA مخصص يعتمد على خوارزمية محاكاة التلدين لتحسين عمليات الإنتاج. يقترح الحل جدولة مثالية مع مراعاة القيود المختلفة. وعلى وجه الخصوص، فهو سليم نظريًا وقابل للتطبيق عمليًا، وبالتالي يعالج التحديات المحددة للجدولة في سياق الإنتاج المعقد.

الكلمات المفتاحية :

الجدولة، إنتاج المستحضرات الصيدلانية، صوفال، تطبيق VBA، محاكاة التلدين الصلب، تحسين العملية، متجر الوظائف، ليكين.