



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel
Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par : Guelieb Eloued Ali Abderrahmane

Ouadah Mohamed Mehdi

Thème

Optimisation de la planification de la production sous
demande prévisionnelle : application au problème
de lot sizing capacitaire chez l'entreprise Delicias

Soutenu publiquement, le 21 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

-M. Mohammed BENNEKROUF	MCA	ESSA-Tlemcen	Président
-M. Fouad MALIKI	MCA	ESSA-Tlemcen	Encadrant
-M. Ziriab BENSENANE	Ingénieur	Delicias	Co-Encadrant
-M. Mohamed Amine CHERIER	MCB	ESSA-Tlemcen	Examineur 1
-Mme. Imen KOULOUGHLI	MCA	ESSA-Tlemcen	Examinatrice 2

Année universitaire : 2025 / 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier **Allah** le Tout-Puissant qui nous a accordé la santé, la détermination et l'endurance requises pour accomplir cette tâche.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **M. Fouad Maliki**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses orientations pertinentes et son suivi rigoureux ont été d'une grande importance dans la réussite de ce travail. Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail ainsi que pour leurs remarques constructives.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous nos professeurs pour la qualité de l'enseignement reçu et les savoirs qu'ils nous ont partagés tout au long de notre cursus universitaire.

Nos remerciements vont également à **M. Bensnane Zeryab**, notre encadrant au sein de l'entreprise Delicias , pour son accueil chaleureux, sa disponibilité, ses orientations précieuses et son accompagnement tout au long de notre stage.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des ouvriers et du personnel de l'entreprise Delicias pour leur collaboration, leur aide et leur esprit d'équipe, qui ont grandement contribué à la réussite de notre travail.

Nous voulons également exprimer notre gratitude envers nos collègues de promotion pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui a caractérisé notre parcours. Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous nos proches et à nos amis pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence constante tout au long de cette aventure.

Dédicace

Avant toute chose, je remercie *Allah*, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la volonté, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa miséricorde et Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents.

À ma mère, source infinie d'amour, de tendresse et de sacrifice. Merci pour tes prières, ton soutien inconditionnel et ta présence constante dans les moments les plus difficiles. Tes encouragements ont toujours été ma plus grande force.

À mon père, pour ses conseils précieux, sa sagesse, son soutien moral et matériel, et pour tous les efforts qu'il a fournis afin de me permettre de poursuivre mes études dans les meilleures conditions. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui.

À mes frères et mes sœurs, pour leur affection, leur soutien et leur confiance. Votre présence à mes côtés est une source de motivation permanente.

À tous les membres de ma famille *GUELLEB ELOUED* et *BENGUETIB*, proches et éloignés, pour leurs encouragements, leurs prières et leur appui tout au long de mon parcours.

À mes chers amis, qui ont partagé avec moi les moments de joie comme les moments de stress, merci pour votre soutien, votre sincérité et votre fidélité.

À mes collègues de promotion, avec qui j'ai vécu des années d'apprentissage, de solidarité et de travail d'équipe. Je garderai de merveilleux souvenirs de ce parcours partagé.

Mes sincères remerciements vont à *M. Bensnane Zeryab*, mon encadrant

en entreprise, pour son accompagnement, ses conseils éclairés et la confiance précieuse qu'il m'a accordée tout au long de mon stage.

À mon encadrant, *M. Fouad Maliki*, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils éclairés et son orientation précieuse qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

À mon binôme, *Ouadah Mehdi*, pour sa collaboration, son engagement et son soutien tout au long de ce PFE. Travailler à tes côtés a été un réel plaisir et a grandement enrichi cette expérience.

Dédicace

Je rends grâce à Allah, le Miséricordieux, qui a éclairé mon chemin tout au long de mes années d'études.

J'offre le fruit de mon travail :

- À mes parents, sources inépuisables de tendresse et de sacrifices. Que le Ciel vous garde longtemps auprès de nous.
- À mon frère et mes deux sœurs, dont l'affection a été mon refuge.
- À l'ensemble de ma famille OUADAH , pour leur soutien et leur présence à chaque étape de ma vie.
- À mon binôme, pour tous les moments de partage, d'entraide et de complicité tout au long de ce parcours.
- À mes compagnons de route, dont la sincérité a embelli ce parcours.
- À mon encadrant de l'entreprise M. Bensnane Zeryab , pour sa disponibilité, ses précieux conseils et la confiance qu'il m'a accordée.
- À mon encadrant pédagogique, M. MALIKI Fouad. Sa disponibilité, ses précieux éclairages et son dévouement ont grandement contribué à l'aboutissement de cette formation.

Qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

Ce travail porte sur l'optimisation de la planification de la production sous demande prévisionnelle au sein de l'entreprise agroalimentaire Delicias (Tlemcen), spécialisée dans le conditionnement de vinaigres et produits alimentaires. Face à l'absence d'outil formalisé de planification, un modèle mathématique de dimensionnement des lots capacitaire (CLSP — Capacitated Lot Sizing Problem) a été formulé en programmation linéaire en nombres entiers et résolu via la bibliothèque Python PuLP couplée au solveur open source CBC. Le modèle couvre dix produits sur deux lignes de production sur un horizon de douze mois, intégrant les contraintes de capacité opérateur, de stockage en palettes et de saisonnalité liée au Ramadan, à partir de prévisions de demande mensuelle établies sur la base des historiques de ventes. Une interface graphique interactive, développée sous CustomTkinter, permet aux responsables de l'entreprise de paramétrer et d'exploiter l'outil de manière autonome et opérationnelle.

Mots-clés : Lot sizing capacitaire (CLSP), planification de la production, demande prévisionnelle, programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), PuLP, CustomTkinter, supply chain, industrie agroalimentaire, gestion des stocks, saisonnalité.

Abstract

This work addresses the optimization of production planning under forecasted demand at Delicias, an Algerian agri-food company based in Tlemcen, specializing in vinegar and condiment packaging. In the absence of a formal planning tool, a Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP) mathematical model was formulated using integer linear programming and solved with Python's PuLP library coupled with the open-source CBC solver. The model covers ten products across two production lines over a twelve-month horizon, incorporating operator capacity constraints, warehouse limitations, and Ramadan seasonal demand peaks, based on monthly demand forecasts derived from historical sales data. An interactive graphical interface developed with CustomTkinter enables the company's managers to configure and use the tool independently in an operational setting.

Keywords : Capacitated Lot Sizing (CLSP), production planning, forecasted demand, integer linear programming (ILP), PuLP, CustomTkinter, supply chain, agri-food industry, inventory management, seasonality.

الملخص

يتناول هذا العمل تحسين تخطيط الإنتاج في ظل الطلب التنبؤي بمؤسسة دليسياس الجزائرية للصناعات الغذائية (تلمسان)، المتخصصة في تعبئة الخل والمنتجات الغذائية. في غياب أداة تخطيط رسمية، تم صياغة نموذج رياضي لتحديد أحجام الدُفعات الطاقوي (CLSP) باستخدام البرمجة الخطية الصحيحة، وحُلَّ بواسطة مكتبة PuLP في لغة Python مع المحلل مفتوح المصدر CBC . يغطي النموذج عشرة منتجات على خطي إنتاج خلال أفق تخطيط يمتد إلى اثني عشر شهرًا، مع مراعاة قيود طاقة المشغل ومحدودية التخزين والطلب الموسمي المرتبط بشهر رمضان، اعتمادًا على توقعات الطلب الشهري المستندة إلى سجلات المبيعات التاريخية. كما تم تطوير واجهة رسومية تفاعلية باستخدام مكتبة CustomTkinter ، تُمكن مسؤولي المؤسسة من ضبط الأداة واستعمالها بصورة مستقلة ضمن بيئة تشغيلية فعلية.

الكلمات المفتاحية : تحديد أحجام الدُفعات الطاقوي (CLSP)، تخطيط الإنتاج، الطلب التنبؤي، البرمجة الخطية الصحيحة، PuLP ، CustomTkinter ، سلسلة التوريد، الصناعة الغذائية، إدارة المخزون، الموسمية.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction

1	la logistique et le Problème de Lot sizing	3
1.1	Introduction	3
1.2	Généralité sur la logistique	4
1.2.1	Définition de la logistique	4
1.2.2	Définition de la Supply Chain	5
1.2.3	Objectifs de la Supply Chain	6
1.2.4	Flux logistiques	7
1.3	Planification de la production	8
1.3.1	Définition de la planification	8
1.3.2	Niveaux de planification	9
1.3.3	Plan Directeur de Production (PDP)	11
1.3.4	MRP (Material Requirements Planning)	12
1.4	Gestion des stocks	13

1.4.1	Types de stocks	13
1.4.2	Coûts liés aux stocks	15
1.5	Problème de Lot Sizing	16
1.5.1	Définition du Lot Sizing	16
1.6	Classification des modèles de Lot Sizing	17
1.6.1	Modèles classiques de Lot Sizing	17
1.6.2	Modèles statiques vs dynamiques	20
1.6.3	Modèles déterministes vs stochastiques	21
1.6.4	Modèles mono-produit vs multi-produits	22
1.6.5	Modèles capacitaires vs non capacitaires	23
1.7	Méthodes de résolution d'un problème de lot sizing	23
1.7.1	Méthodes exactes	24
1.7.2	Méthodes heuristiques	25
1.7.3	Métaheuristiques	26
1.8	Conclusion	27
2	Entreprise Delicias	29
2.1	Introduction	29
2.2	Présentation de l'entreprise	30
2.2.1	Historique et évolution	30
2.2.2	Organisation générale	31
2.3	Structure logistique et zone de distribution	31
2.3.1	Infrastructure logistique	31
2.3.2	Zone géographique desservie	31
2.4	Gamme de produits	32
2.5	Système de Production	35
2.5.1	Description des équipements	35
2.5.2	Flux de production	36
2.5.3	Organisation de la main-d'œuvre	36
2.5.4	Temps de cycle et changements de série	37
2.6	Système de Stockage	37
2.6.1	Organisation de l'entrepôt	37
2.6.2	Capacité de stockage par produit	38

2.7	Approvisionnement en Matières Premières	39
2.8	Analyse de la Demande	39
2.8.1	Mode de collecte et de prévision	39
2.8.2	Saisonnalité de la demande	40
2.9	Identification du Problème de Planification	40
2.9.1	Système de planification actuel	40
2.9.2	Justification du recours à l'optimisation	41
2.10	Conclusion	41
3	Formulation et Résolution du Modèle	43
3.1	Introduction	43
3.2	Définition du problème	44
3.3	Modèle Mathématique	45
3.3.1	Ensembles	45
3.3.2	Paramètres	46
3.3.3	Capacité effective par mois	46
3.3.4	Variables de décision	47
3.3.5	Fonction objectif	48
3.3.6	Contraintes	48
3.3.7	Domaines des variables	51
3.4	Données Numériques	52
3.4.1	Données prévisionnelles de l'entreprise	52
3.4.2	Paramètres de production	53
3.4.3	Capacités disponibles et stocks de sécurité	54
3.5	Implémentation et Résolution	55
3.5.1	Environnement de développement	55
3.5.2	Paramètres de résolution	55
3.6	PuLP : bibliothèque Python pour l'optimisation linéaire	56
3.6.1	Origine et contexte de développement	56
3.6.2	Positionnement parmi les outils d'optimisation	56
3.6.3	Architecture interne de PuLP	57
3.6.4	Solveurs compatibles	58
3.6.5	Fonctionnement général de PuLP	60

3.6.6	PuLP dans le cadre de ce mémoire	60
3.7	CustomTkinter : bibliothèque d'interface graphique plus moderne	61
3.7.1	Origine et contexte de développement	61
3.7.2	Architecture interne de CustomTkinter	61
3.8	Résultats de l'Optimisation	63
3.8.1	Indicateurs clés de performance	63
3.8.2	Vérifications d'intégrité	63
3.8.3	Plan de production optimal	63
3.8.4	Stocks de fin de mois	64
3.8.5	Utilisation de la capacité de stockage	68
3.8.6	Taux de service	69
3.8.7	Utilisation de les machines M1 et M2	70
3.9	Interprétation des résultats de l'optimisation	71
3.10	Conclusion	74

Table des figures

1.1	Les flux logistiques	8
1.2	Les niveaux de planification	11
2.1	Entreprise delicias	30
2.2	Organigramme de Delicias	31
2.3	Zone géographique desservie	32
3.1	Interface Customtkinter-Delicias	62
3.2	Stock par rapport la demande partie 1	66
3.3	Stock par rapport la demande partie 2	67
3.4	Palettes occupées par produit et par mois	69
3.5	Utilisation de les machines M1 et M2	70

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des types de stocks	14
2.1	Gamme de produits Delicias et ligne de production associée . . .	33
2.2	Gamme de produits Delicias	34
2.3	Équipements du site de production 1	35
2.4	Répartition des opérateurs par poste	36
2.5	Temps de cycle et de changement de série par ligne	37
2.6	Capacité de stockage par palette (F_i) et stock de sécurité (SS_i) . . .	38
3.1	Demande prévisionnelle mensuelle — Ligne M1 (fardeaux)	52
3.2	Demande prévisionnelle mensuelle — Ligne M2 (fardeaux)	52
3.3	Tailles de lots B_i , capacités palette F_i , et marges m_i	53
3.4	Jours ouvrés, capacités effectives et stocks de sécurité	54
3.5	Stocks initiaux $I_{i,0}$ et stocks de sécurité SS_i	54
3.6	Outils et bibliothèques utilisés	55
3.7	Comparaison de PuLP avec les principaux outils d'optimisation linéaire	57
3.8	Principaux solveurs compatibles avec PuLP	59
3.9	Résultats globaux de la solution optimale	63
3.10	Plan de production optimal — Nombre de préparations (lots) par mois	64
3.11	Stocks de fin de mois (fardos entiers)	65
3.12	Palettes occupées par produit et par mois	68

3.13 Taux de service mensuel par produit (%)	69
3.14 Utilisation de la capacité opérateur par mois	70

Liste des abréviations

Acronyme	Signification
SC	Supply Chain (Chaîne logistique)
SCM	Supply Chain Management (Gestion de la chaîne logistique)
CLSP	Capacitated Lot Sizing Problem
EOQ	Economic Order Quantity (Quantité économique de commande)
PME	Petite et Moyenne Entreprise
MRP	Material Requirements Planning (Planification des besoins en composants)
PDP	Plan Directeur de Production
PIC	Plan Industriel et Commercial
PL	Programmation Linéaire
PLNE	Programmation Linéaire en Nombres Entiers
MILP	Mixed Integer Linear Programming
CBC	COIN-OR Branch and Cut (Solveur open source)
GA	Genetic Algorithm (Algorithme génétique)
M1	Machine / Ligne de production 1 (vinaigres aromatisés)
M2	Machine / Ligne de production 2 (produits spéciaux)
SS	Stock de Sécurité
V4°	Vinaigre 4 degrés
EDF	Eau de fleur
V3L	Vinaigre 3 litres
Bic	Bicarbonate
Vapo	Vaporisateur

Introduction

Le secteur de l'industrie agroalimentaire occupe une place importante dans l'économie mondiale et nationale. Il joue un rôle essentiel dans la transformation des matières premières agricoles en produits destinés à la consommation humaine. Ce secteur est caractérisé par une forte concurrence, des exigences strictes en matière de qualité et de sécurité alimentaire, ainsi que par une évolution constante des besoins et des préférences des consommateurs. Dans ce contexte, les entreprises agroalimentaires doivent améliorer en permanence leurs performances afin de rester compétitives sur le marché.

L'optimisation des processus de production constitue donc un enjeu majeur pour ces entreprises. En effet, une gestion efficace des ressources, des matières premières et des capacités de production permet de réduire les coûts tout en garantissant la satisfaction de la demande des clients. Parmi les activités essentielles de la gestion industrielle, la planification de la production occupe une place centrale. Elle consiste à organiser et coordonner les différentes opérations de production afin d'assurer une utilisation optimale des ressources disponibles.

La planification de la production vise principalement à déterminer quelles quantités produire, à quel moment et avec quels moyens. Elle doit prendre en compte plusieurs contraintes telles que la capacité des machines, la disponibilité des matières premières, les délais de production et les niveaux de stockage. Une planification efficace permet ainsi d'éviter les ruptures de stock, de réduire les surplus de production et d'améliorer la performance globale du système de production.

Dans ce cadre, le problème du dimensionnement des lots de production, connu sous le nom de Lot Sizing, constitue une problématique fondamentale de la gestion de production. Le Lot Sizing consiste à déterminer la quantité optimale de produits à fabriquer durant une période donnée afin de satisfaire la demande tout en minimisant les coûts liés à la production, au stockage et aux changements de série. Une mauvaise détermination des tailles de lots peut entraîner des coûts élevés de stockage, une sous-utilisation des capacités de production ou encore des retards dans la livraison des produits.

Dans les entreprises agroalimentaires, cette problématique est encore plus importante en raison de certaines spécificités du secteur, telles que la périssabilité des produits, la variabilité de la demande et la nécessité de maintenir un niveau élevé de qualité. Ces contraintes rendent la planification de la production plus complexe et nécessitent l'utilisation d'outils et de méthodes d'optimisation adaptés.

Dans ce contexte, l'objectif principal de ce travail est d'étudier et d'optimiser le dimensionnement des lots de production au sein d'une entreprise agroalimentaire. Il s'agit notamment de proposer un modèle permettant d'améliorer la planification de la production, de réduire les coûts associés et d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles. Cette étude vise également à analyser les contraintes réelles de l'entreprise et à proposer une approche adaptée à son environnement de production.

Afin d'atteindre ces objectifs, une méthodologie structurée a été adoptée. Elle repose dans un premier temps sur une étude bibliographique portant sur les concepts de la logistique, de la gestion de production et des modèles de dimensionnement des lots. Ensuite, une analyse du système de production de l'entreprise est réalisée afin d'identifier les données nécessaires et les principales contraintes du processus. Enfin, un modèle mathématique d'optimisation est développé afin de déterminer les quantités optimales de production sur un horizon de planification donné.

CHAPITRE 1

LA LOGISTIQUE ET LE PROBLÈME DE LOT SIZING

1.1 Introduction

La gestion efficace de la production constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour les entreprises industrielles, en particulier dans le secteur agroalimentaire caractérisé par une forte diversité de produits, une variabilité de la demande et des contraintes de qualité strictes. Dans ce contexte, la planification de la production joue un rôle central dans l'amélioration de la performance globale de l'entreprise, en permettant d'assurer un équilibre optimal entre les coûts, les délais et la satisfaction des clients.

Parmi les problématiques clés de la planification de la production, le dimensionnement des lots, connu sous le nom de Lot Sizing, occupe une place essentielle. Il consiste à déterminer les quantités optimales à produire sur une période donnée, tout en tenant compte des coûts de production, de stockage et des contraintes opérationnelles. Une mauvaise gestion des tailles de lots peut entraîner soit des surstocks coûteux, soit des ruptures de stock pénalisantes pour l'entreprise.

Au fil des années, plusieurs modèles et approches ont été développés pour traiter le problème du lot sizing, allant des modèles simples à produit unique, tels que le modèle économique de commande, jusqu'aux modèles plus complexes intégrant plusieurs produits et des contraintes de capacité. Ces modèles permettent de mieux comprendre les compromis entre les coûts de lancement, les coûts de stockage et les capacités disponibles.

Dans un environnement industriel réel, notamment dans les entreprises agroalimentaires produisant une large gamme de produits comme le vinaigre, les produits alimentaires transformés et les additifs, le problème devient encore plus complexe. Il s'agit alors de gérer simultanément plusieurs produits sur des périodes multiples, tout en respectant les limites des ressources de production. C'est dans ce cadre que le problème du Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP) s'impose comme un modèle de référence.

Le CLSP permet de modéliser de manière réaliste les systèmes de production en intégrant à la fois la diversité des produits, la variabilité de la demande et les contraintes de capacité. Il constitue ainsi un outil puissant pour aider les décideurs à établir des plans de production optimaux et à améliorer l'efficacité opérationnelle.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les fondements théoriques nécessaires à la compréhension du problème étudié. Il s'agira dans un premier temps d'introduire les concepts de base liés à la logistique et à la gestion de la production, puis d'examiner les différents modèles de gestion des stocks et de lot sizing proposés dans la littérature. Une attention particulière sera accordée aux modèles avancés, notamment le CLSP, ainsi qu'aux méthodes de résolution associées.

1.2 Généralité sur la logistique

1.2.1 Définition de la logistique

La logistique constitue une fonction essentielle et stratégique au sein de l'entreprise moderne. Elle regroupe l'ensemble des activités permettant de planifier, organiser, mettre en œuvre et contrôler les flux physiques de marchandises ainsi que les flux d'informations associés, depuis le point d'origine jusqu'au point de consommation final. Ces activités incluent notamment l'approvisionnement en matières premières, la gestion des stocks, la manutention, le transport et la distribution des produits finis.

la logistique est la partie de la Supply Chain qui assure la gestion efficace des flux et du stockage des biens, des services et des informations. Elle vise

principalement à satisfaire les exigences des clients tout en minimisant les coûts globaux. Cette définition met en évidence le rôle central de la logistique dans la performance globale de l'entreprise.

La logistique moderne ne se limite plus à une simple fonction opérationnelle. Elle est devenue un levier stratégique permettant d'améliorer la compétitivité de l'entreprise. En effet, une gestion efficace des flux logistiques permet de réduire les délais de livraison, d'optimiser les niveaux de stocks et d'améliorer la qualité de service offerte aux clients.

Par ailleurs, la logistique intègre aujourd'hui des technologies avancées telles que les systèmes d'information logistique, les logiciels ERP (Enterprise Resource Planning), les systèmes de gestion d'entrepôt (WMS) et les outils de traçabilité. Ces technologies permettent une meilleure visibilité des opérations et facilitent la prise de décision.

En outre, la logistique implique une coordination étroite entre les différents acteurs internes et externes de l'entreprise, notamment les fournisseurs, les transporteurs et les distributeurs. Cette coordination permet d'assurer une fluidité des flux et d'éviter les dysfonctionnements tels que les ruptures de stock ou les retards de livraison. [1, 2]

1.2.2 Définition de la Supply Chain

La Supply Chain, ou chaîne logistique, représente l'ensemble des organisations, des ressources, des activités et des technologies impliquées dans le processus de création et de livraison d'un produit ou d'un service, depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au client final. Elle inclut non seulement les flux physiques, mais également les flux d'informations et les flux financiers qui relient les différents acteurs.

la Supply Chain est un réseau d'entreprises interconnectées et interdépendantes qui travaillent ensemble pour gérer et améliorer les flux de produits, d'informations et de services. Cette vision met l'accent sur la collaboration et la coordination entre les différents maillons de la chaîne.

La gestion de la Supply Chain, appelée Supply Chain Management (SCM), consiste à optimiser l'ensemble de ces flux afin de maximiser la valeur créée

pour le client final. Elle englobe plusieurs fonctions clés, telles que l'approvisionnement, la production, la gestion des stocks, la distribution et le service après-vente.

Dans un environnement concurrentiel et globalisé, la performance d'une entreprise dépend de plus en plus de l'efficacité de sa Supply Chain. En effet, ce ne sont plus les entreprises individuelles qui sont en concurrence, mais plutôt les chaînes logistiques dans leur ensemble. Une Supply Chain performante permet de réduire les coûts, d'améliorer la qualité des produits et de raccourcir les délais de livraison.

Enfin, la gestion de la Supply Chain intègre également des préoccupations liées au développement durable, notamment en matière de réduction de l'empreinte environnementale et de responsabilité sociale des entreprises. [3] [2]

1.2.3 Objectifs de la Supply Chain

La Supply Chain (SC) désigne l'ensemble des flux physiques, informationnels et financiers reliant les fournisseurs aux clients finals. Son pilotage repose sur plusieurs objectifs fondamentaux :[4]

1. Satisfaction client :

Livrer le bon produit, au bon endroit, au bon moment et au bon prix reste l'objectif premier de toute SC . Le taux de service est l'indicateur central de cet objectif.

2. Réduction des coûts :

Optimiser les coûts de stockage, de transport et d'approvisionnement sans dégrader le niveau de service constitue un équilibre permanent

3. Flexibilité et réactivité :

Face à la volatilité de la demande, préconise une SC "Triple-A" : Agile, Adaptable et Alignée, capable de répondre rapidement aux perturbations.

4. Qualité et fiabilité :

Garantir la conformité des produits à chaque maillon, assurer la traçabilité et respecter les normes réglementaires.

5. Gestion des risques :

Renforcer la résilience face aux ruptures d'approvisionnement, aux crises géopolitiques ou sanitaires, en diversifiant les sources et en constituant des stocks de sécurité .

6. Durabilité (SC verte) :

Intégrer les critères ESG — réduction de l'empreinte carbone, conditions sociales des fournisseurs, gouvernance éthique — dans toutes les décisions SC .

7. Intégration et collaboration :

Coordonner étroitement fournisseurs, producteurs et distributeurs via le partage d'informations et des partenariats stratégiques .

8. Performance globale (KPI) :

Piloter la SC à travers des indicateurs clés — taux de service, délai de livraison, rotation des stocks, coût total — selon le modèle SCOR.

1.2.4 Flux logistiques

La Supply Chain repose sur l'interaction de trois types de flux fondamentaux : les flux physiques, les flux informationnels et les flux financiers. Ces flux sont interdépendants et leur bonne gestion est essentielle pour assurer l'efficacité globale du système logistique.

Les flux physiques(aval) : correspondent au déplacement des matières premières, des produits semi-finis et des produits finis tout au long de la chaîne

logistique. Ils incluent les opérations de transport, de stockage, de maintenance et de distribution. La gestion de ces flux vise à minimiser les coûts tout en garantissant la disponibilité des produits.

Les flux d'informations(amont) : concernent l'ensemble des données échangées entre les différents acteurs de la Supply Chain. Cela inclut les commandes, les prévisions de la demande, les niveaux de stock, les délais de livraison et les informations de traçabilité. Une bonne gestion des flux informationnels permet d'améliorer la coordination et de réduire les incertitudes.

Les flux financiers : représentent les mouvements monétaires entre les différents partenaires, tels que les paiements, les facturations et les crédits. Ils assurent la viabilité économique de la chaîne logistique.

L'intégration de ces trois flux est essentielle pour optimiser la performance de la Supply Chain. une gestion efficace des flux permet d'améliorer la réactivité de la Supply Chain, de réduire les coûts et d'augmenter la satisfaction des clients. [5]



FIGURE 1.1 – Les flux logistiques

1.3 Planification de la production

1.3.1 Définition de la planification

La planification de la production est une activité fondamentale de la gestion industrielle qui consiste à organiser et prévoir l'ensemble des ressources néces-

saires à la fabrication des produits sur un horizon donné. Elle vise à déterminer quoi produire, en quelle quantité, à quel moment et avec quelles ressources, afin de satisfaire la demande tout en optimisant les coûts et les performances de l'entreprise.

la planification est un processus décisionnel qui permet d'anticiper les besoins futurs et de coordonner les différentes activités de production. Elle joue un rôle essentiel dans la synchronisation des opérations et dans l'alignement des objectifs stratégiques et opérationnels.

La planification de la production repose sur plusieurs éléments clés, tels que les prévisions de la demande, les capacités de production, les niveaux de stock et les délais de fabrication. Elle nécessite une collecte et une analyse rigoureuse des données afin de garantir la fiabilité des décisions prises.

Elle permet également de réduire les incertitudes liées à la variabilité de la demande et aux aléas de production. En anticipant les besoins, l'entreprise peut éviter les ruptures de stock, limiter les surcharges de travail et améliorer l'utilisation des ressources.

Par ailleurs, la planification contribue à améliorer la productivité et la qualité des produits en assurant une meilleure organisation des activités. Elle favorise également la communication entre les différents services de l'entreprise, tels que la production, la logistique et les achats. [6]

1.3.2 Niveaux de planification

La planification de la production se structure en plusieurs niveaux hiérarchiques afin de répondre aux différents horizons de décision et aux objectifs de l'entreprise. On distingue généralement trois niveaux principaux : stratégique, tactique et opérationnel.

Niveau 1 — Stratégique (long terme : 3 à 5 ans)

La planification stratégique constitue le niveau le plus élevé de la hiérarchie décisionnelle de la Supply Chain. Elle concerne les décisions structurelles qui engagent l'entreprise sur le long terme et qui sont difficiles à remettre en cause une fois prises. ce niveau vise à concevoir la configuration globale du réseau logistique. Les décisions portent sur le nombre et la localisation des usines de

production, des entrepôts et des centres de distribution. Il s'agit également de choisir les marchés à servir, les modes de transport à privilégier et les partenaires stratégiques à intégrer dans la chaîne. La sélection des fournisseurs clés et la politique d'externalisation (make or buy) relèvent aussi de ce niveau. L'horizon temporel dépasse généralement trois ans, ce qui implique une forte incertitude et des investissements lourds. Les décisions stratégiques déterminent les capacités disponibles pour les niveaux inférieurs. Une mauvaise configuration du réseau à ce stade se répercute durablement sur les coûts et la réactivité de toute la chaîne. L'objectif final est de maximiser la valeur créée pour le client tout en minimisant le coût total du réseau sur le long terme.

Niveau 2 — Tactique (moyen terme : 6 mois à 2 ans)

La planification tactique s'inscrit dans le cadre fixé par les décisions stratégiques et vise à optimiser l'utilisation des ressources existantes sur un horizon de moyen terme. la planification des flux et des capacités dans les contraintes structurelles déjà établies. Les décisions tactiques portent notamment sur la planification de la production agrégée, la gestion des stocks de sécurité, la définition des politiques d'approvisionnement et la négociation des contrats avec les fournisseurs. Ce niveau intègre également la planification de la main-d'œuvre, l'affectation des budgets logistiques et la répartition des volumes entre les différents sites. Les responsables tactiques doivent anticiper les variations saisonnières de la demande et adapter les capacités en conséquence. Les décisions prises ici influencent directement les coûts opérationnels et la flexibilité de la chaîne face aux aléas. L'horizon de planification se situe généralement entre six mois et deux ans, ce qui permet des ajustements sans remettre en cause les investissements stratégiques. L'enjeu central est d'équilibrer l'offre et la demande de façon efficiente sur le moyen terme.

Niveau 3 — Opérationnel (court terme : jour à semaine)

La planification opérationnelle représente le niveau d'exécution quotidien de la Supply Chain. Elle traduit concrètement les décisions tactiques en actions immédiates sur le terrain. Ce niveau couvre un horizon très court, allant de quelques heures à quelques semaines. Les décisions opérationnelles incluent l'ordonnancement des commandes, le lancement des ordres de fabrication, la gestion des expéditions et l'affectation des stocks disponibles aux commandes

clients. À ce niveau, les capacités et les ressources sont considérées comme fixes : il s'agit d'optimiser leur utilisation dans les contraintes existantes. Les responsables opérationnels gèrent également les aléas quotidiens tels que les retards fournisseurs, les pannes machines ou les pics de commandes imprévus. La rapidité de décision et la précision de l'exécution sont les qualités essentielles.

Ces trois niveaux sont interdépendants et doivent être cohérents entre eux. Une mauvaise coordination peut entraîner des inefficacités, telles que des surcapacités ou des pénuries. [4]

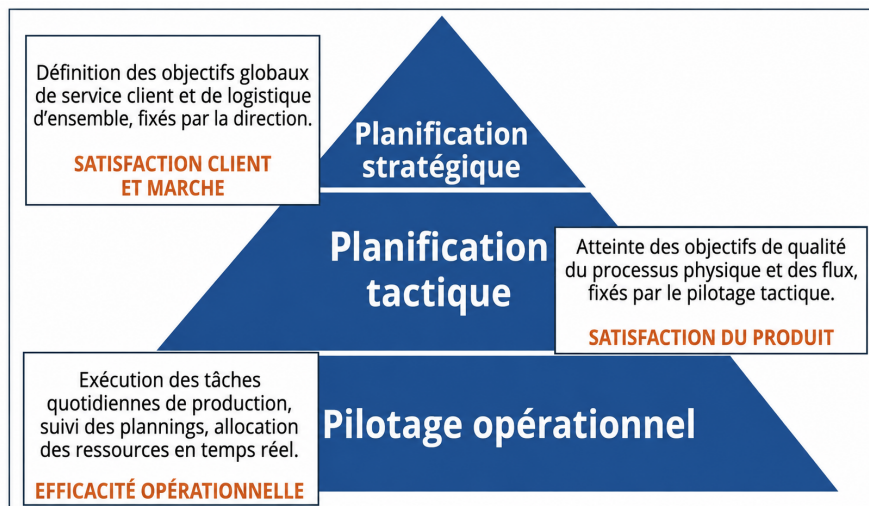


FIGURE 1.2 – Les niveaux de planification

1.3.3 Plan Directeur de Production (PDP)

Le Plan Directeur de Production (PDP), appelé en anglais Master Production Schedule (MPS), est un outil central de la planification industrielle qui traduit le Plan Industriel et Commercial (PIC) en un programme détaillé de production par produit fini et par période. Le PDP constitue le lien fondamental entre la planification agrégée de moyen terme et l'exécution opérationnelle à court terme. Il représente l'engagement de l'entreprise à produire des quantités précises de produits finis à des dates définies, en tenant compte des capacités disponibles et des prévisions de la demande. L'horizon du PDP s'étend généralement sur une période de 4 à 12 semaines, découpée en périodes hebdomadaires ou jour-

nalières selon le secteur d'activité. Cette granularité fine permet une gestion précise des ressources et des approvisionnements nécessaires à la production. Le PDP intègre trois sources d'information essentielles : les prévisions commerciales issues du service marketing, les commandes fermes des clients déjà enregistrées, et les stocks disponibles en entrepôt. La combinaison de ces trois données permet de calculer les besoins nets réels en production pour chaque période. Il remplit également une fonction de stabilisation : une fois validé, le PDP ne doit pas être modifié sans analyse préalable des impacts, car toute modification en cascade affecte les approvisionnements, la charge des ateliers et les délais de livraison clients. Le PDP sert de point d'entrée au calcul des besoins en composants via le MRP (Material Requirements Planning). C'est à partir du PDP que le système MRP déroule l'ensemble des besoins en matières, composants et sous-ensembles nécessaires à la réalisation du programme de production.[7]

1.3.4 MRP (Material Requirements Planning)

Le Material Requirements Planning (MRP) est un système de planification des besoins en composants et en matières premières, conçu pour déterminer quoi produire ou approvisionner, en quelle quantité et à quel moment, afin de satisfaire le Plan Directeur de Production (PDP).

Le MRP repose sur trois données fondamentales d'entrée. La première est le PDP, qui fournit les quantités de produits finis à réaliser par période. La deuxième est la Nomenclature (Bill of Materials — BOM), qui décrit la structure arborescente du produit en décomposant chaque article fini en sous-ensembles, composants et matières premières avec leurs quantités nécessaires. La troisième est le fichier des stocks (Inventory Records), qui renseigne les quantités disponibles, les en-cours de fabrication et les commandes déjà passées aux fournisseurs.

À partir de ces trois entrées, le MRP effectue un calcul en cascade, niveau par niveau dans la nomenclature, pour déterminer les besoins bruts, puis les besoins nets après déduction des stocks disponibles et des réceptions attendues. Il génère ensuite des ordres de fabrication (OF) pour les composants fabriqués en interne et des ordres d'achat (OA) pour les composants approvisionnés à

l'extérieur.

Le calcul intègre systématiquement les délais d'obtention (lead times) de chaque composant, ce qui permet de décaler dans le temps les lancements d'ordres et d'anticiper les approvisionnements avec précision. Cette logique de décalage temporel est appelée offsetting.

Le MRP permet ainsi d'éviter deux dysfonctionnements majeurs : les ruptures de stock qui bloquent la production, et les surstocks inutiles qui immobilisent la trésorerie. Il contribue directement à la réduction des coûts logistiques et à l'amélioration du taux de service.

Le MRP a ensuite évolué vers le MRP II (Manufacturing Resource Planning), qui intègre en plus la planification des capacités, des ressources humaines et des flux financiers, élargissant ainsi son périmètre à l'ensemble des ressources de l'entreprise. [7]

1.4 Gestion des stocks

1.4.1 Types de stocks

Le stock désigne toute quantité de matière, de composant ou de produit fini conservée par une entreprise en attente d'utilisation ou de commercialisation. Il joue un rôle stratégique dans l'équilibre entre l'offre et la demande à chaque maillon de la Supply Chain .

Catégorie	Type de stock	Description
Selon leur fonction	Stock de cycle (actif)	Marchandises pour répondre à la demande habituelle
	Stock de sécurité (tampon)	Quantité minimale pour pallier retards ou pics de demande
	Stock de précaution	Évite les ruptures en cas d'incertitude
	Stock de spéculation	Achat anticipé pour hausse des prix ou pénurie
	Stock saisonnier	Couvre une demande concentrée sur une courte période
	Stock dormant / mort	Produits obsolètes, endommagés ou invendables
Selon leur état physique	Stock en transit	Marchandises commandées, en cours d'acheminement
	Stock disponible	Produits physiquement présents et utilisables immédiatement
	Stock physique	Totalité des produits présents dans l'entrepôt
	Stock net	Stock physique – commandes en cours + commandes fournisseurs
	Stock en quarantaine	Produits reçus en attente de contrôle qualité
Selon la gestion	Stock périssable	Produits avec DLC/DLUO, gestion FIFO/FEFO
	Stock d'alerte	Niveau déclenchant une commande automatique
	Stock minimum	Seuil critique avant rupture
	Stock maximum	Quantité max pour éviter surcoûts
selon le flux (WIP)	Matières premières	Composants de base
	Produits semi-finis	Produits en cours de fabrication
	Produits finis	Marchandises prêtes à la vente

TABLE 1.1 – Récapitulatif des types de stocks

1.4.2 Coûts liés aux stocks

Les coûts liés aux stocks figurent parmi les charges les plus importantes de la Supply Chain. Leur maîtrise conditionne directement la rentabilité de l'entreprise et sa capacité à maintenir un niveau de service satisfaisant pour le client . **Le coût de possession** : aussi désigné coût de détention, regroupe toutes les charges découlant de la simple détention d'un stock. Il intègre le coût d'opportunité du capital immobilisé, les frais d'entreposage — loyer, énergie, manutention — ainsi que les primes d'assurance, les dépréciations comptables et les risques d'obsolescence. Il représente en pratique entre 20 et 40 % de la valeur annuelle du stock et constitue le principal levier d'action pour réduire les coûts logistiques globaux.

Le coût de passation : de commande correspond aux dépenses engagées à chaque déclenchement d'un approvisionnement externe ou d'un ordre de fabrication interne. Il couvre les frais administratifs de traitement, les charges de transport et de réception, les opérations de contrôle qualité à l'entrée ainsi que les coûts de mise en route des équipements de production. Sa réduction passe par la dématérialisation des processus d'achat et la consolidation des commandes.

Le coût de rupture : survient dès lors que la demande ne peut être honorée faute de stock disponible. Il se manifeste soit par une vente définitivement perdue, soit par une commande différée que le client accepte d'attendre. Ses conséquences dépassent la seule perte de chiffre d'affaires immédiate : dégradation de l'image de marque, érosion de la fidélité client et, dans certains secteurs, application de pénalités contractuelles. Sa quantification reste difficile mais son impact peut dépasser celui de tous les autres coûts réunis.

Le coût de sur-stockage : résulte de la détention de quantités supérieures aux besoins réels. Il se traduit par une immobilisation financière excessive, une occupation inutile de l'espace d'entreposage et un risque accru d'obsolescence. Dans les secteurs à cycle de vie court — électronique grand public, mode, agroalimentaire — il peut conduire à des dépréciations sévères et à des liquidations à prix sacrifiés.

Le coût de qualité : recouvre les pertes liées à la détérioration des produits

en stock du fait de conditions d'entreposage inadaptées ou d'une durée de conservation dépassée. Il englobe les charges de traitement des retours, les opérations de reconditionnement et les destructions de lots non conformes aux normes réglementaires.

En définitive, la gestion optimale des stocks repose sur un arbitrage constant entre le coût de possession, qui pousse à réduire les niveaux de stock, et le coût de rupture, qui incite à les maintenir suffisamment élevés. Trouver le point d'équilibre entre ces deux forces antagonistes constitue l'enjeu central de toute politique de gestion des stocks dans une Supply Chain performante . [8]

1.5 Problème de Lot Sizing

1.5.1 Définition du Lot Sizing

Le Lot Sizing, ou dimensionnement des lots, est une notion essentielle en gestion de la production et des stocks. Il consiste à déterminer les quantités optimales à produire ou à approvisionner ainsi que les périodes auxquelles ces décisions doivent être prises, afin de répondre efficacement à la demande. L'objectif principal est de minimiser le coût total, qui inclut généralement les coûts de lancement de production ou de commande, les coûts de stockage et, dans certains cas, les coûts de rupture.

Dans un contexte industriel, le Lot Sizing joue un rôle clé dans l'organisation des opérations, car il permet de mieux exploiter les ressources disponibles, telles que les équipements, la main-d'œuvre et les matières premières. Il prend en compte différentes contraintes, notamment les capacités de production, les délais et la variabilité de la demande. Ce problème peut se présenter sous plusieurs formes, allant de situations simples avec un seul produit à des cas plus complexes impliquant plusieurs produits et périodes.

Le principe fondamental repose sur un compromis entre produire en grandes quantités, ce qui réduit la fréquence des lancements mais augmente les coûts de stockage, et produire en petites quantités, ce qui diminue les stocks mais engendre davantage de coûts de lancement. Le Lot Sizing vise donc à trouver la meilleure stratégie permettant de satisfaire la demande tout en optimisant les

coûts sur un horizon de planification donné.

Il constitue ainsi un outil d'aide à la décision indispensable pour améliorer la performance globale des systèmes de production et renforcer la compétitivité des entreprises. [9]

1.6 Classification des modèles de Lot Sizing

1.6.1 Modèles classiques de Lot Sizing

Modèle EOQ (Economic Order Quantity) :

Le modèle EOQ (Economic Order Quantity), ou quantité économique de commande, est l'un des modèles les plus fondamentaux en gestion des stocks et en lot sizing. Il a été développé pour déterminer la quantité optimale à commander ou à produire afin de minimiser le coût total, qui comprend principalement les coûts de commande (ou de lancement) et les coûts de stockage. Ce modèle repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices, notamment une demande constante et connue, un délai d'approvisionnement fixe et l'absence de rupture de stock.

Le principe du modèle EOQ est basé sur un compromis économique. D'une part, produire ou commander en grande quantité permet de réduire les coûts de lancement, mais augmente les coûts de stockage. D'autre part, produire en petites quantités réduit les coûts de stockage, mais augmente la fréquence des commandes et donc les coûts associés. Le modèle EOQ permet de trouver la quantité optimale qui équilibre ces deux types de coûts.

Mathématiquement, la quantité économique est obtenue à partir d'une formule analytique simple, ce qui rend ce modèle très facile à appliquer. Il constitue souvent un point de départ pour l'analyse de systèmes plus complexes.

Cependant, le modèle EOQ présente des limites importantes. Il ne prend pas en compte la variabilité de la demande, les contraintes de capacité ou la gestion multi-produits. Malgré cela, il reste largement utilisé dans la pratique pour sa simplicité et son efficacité dans des environnements stables. [10]

Modèle Wagner-Whitin :

Le modèle de Wagner-Whitin est un modèle dynamique de lot sizing qui traite le cas où la demande varie au cours du temps. Introduit en 1958, ce modèle constitue une avancée majeure par rapport au modèle EOQ, car il permet de déterminer une politique de production optimale sur plusieurs périodes. Il s'applique dans un contexte déterministe sans contrainte de capacité.

Le modèle repose sur l'idée que la production doit être planifiée de manière à couvrir la demande sur plusieurs périodes tout en minimisant les coûts totaux, incluant les coûts de lancement et les coûts de stockage. Contrairement au modèle EOQ, il n'impose pas une taille de lot fixe, mais détermine dynamiquement les quantités à produire à chaque période.

La résolution du modèle de Wagner-Whitin se fait généralement par programmation dynamique. Cette méthode permet de garantir une solution optimale en explorant les différentes possibilités de production sur l'horizon de planification.

Ce modèle est particulièrement utile dans les environnements où la demande est connue mais variable. Il constitue la base de nombreux systèmes de planification modernes, notamment le MRP.

Cependant, il ne prend pas en compte les contraintes de capacité, ce qui limite son application dans les environnements industriels complexes. Malgré cela, il reste une référence théorique importante dans le domaine du lot sizing. [11]

Méthode Silver-Meal :

La méthode Silver-Meal est une heuristique largement utilisée pour résoudre les problèmes de lot sizing dynamique. Elle a été proposée comme une alternative plus simple au modèle de Wagner-Whitin, permettant d'obtenir rapidement des solutions proches de l'optimum.

Le principe de cette méthode consiste à minimiser le coût moyen par période. Pour cela, elle regroupe plusieurs périodes de demande dans un même lot de production, tant que le coût moyen par période diminue. Dès que ce coût commence à augmenter, un nouveau lot est lancé.

Cette approche est particulièrement intéressante dans les environnements où la demande varie dans le temps, car elle permet d'adapter les décisions de production de manière progressive. Elle est simple à implémenter et ne nécessite pas une grande puissance de calcul.

Cependant, la méthode Silver-Meal ne garantit pas une solution optimale, contrairement au modèle de Wagner-Whitin. Elle fournit une solution approchée, mais souvent très satisfaisante en pratique.

Elle est largement utilisée dans les systèmes industriels pour sa rapidité et sa facilité d'utilisation, notamment lorsque les données sont nombreuses et que les modèles exacts deviennent difficiles à résoudre. [12]

Méthode Least Unit Cost (LUC) :

La méthode Least Unit Cost (LUC), ou coût unitaire minimal, est une autre heuristique utilisée pour résoudre les problèmes de lot sizing dynamique. Elle repose sur le principe de minimisation du coût total par unité produite, en tenant compte à la fois des coûts de lancement et des coûts de stockage.

Le fonctionnement de cette méthode consiste à regrouper progressivement les demandes de plusieurs périodes dans un même lot, tout en calculant le coût moyen par unité produite. Tant que ce coût diminue, la méthode continue à regrouper les périodes. Dès que le coût augmente, un nouveau lot est formé.

Cette approche permet de trouver un compromis entre la production en grandes quantités et la réduction des coûts de stockage. Elle est particulièrement adaptée aux environnements où les coûts de stockage sont significatifs.

Comme la méthode Silver-Meal, la méthode LUC ne garantit pas une solution optimale, mais elle offre des résultats satisfaisants avec un effort de calcul réduit. Elle est souvent utilisée dans les systèmes de planification industriels.

Cependant, elle peut être sensible aux variations importantes de la demande, ce qui peut affecter la qualité des solutions obtenues.[13]

Part Period Balancing (PPB) :

La méthode Part Period Balancing (PPB), ou équilibrage des périodes partielles, est une heuristique qui vise à équilibrer les coûts de lancement et les

coûts de stockage. Elle est basée sur le concept de période partielle économique (Economic Part Period), qui représente le rapport entre le coût de lancement et le coût de stockage.

Le principe de la méthode PPB consiste à regrouper les demandes de plusieurs périodes de manière à équilibrer le coût de stockage cumulé avec le coût de lancement. Autrement dit, elle cherche à produire une quantité telle que le coût de stockage supplémentaire soit proche du coût de lancement.

Cette méthode est relativement simple à appliquer et offre des résultats de bonne qualité dans de nombreux cas pratiques. Elle est particulièrement utile lorsque les coûts de lancement sont élevés, car elle favorise la production en lots plus importants.

Comme les autres heuristiques, la méthode PPB ne garantit pas une solution optimale, mais elle permet d'obtenir rapidement une solution acceptable.

Elle est largement utilisée dans les systèmes MRP et dans les environnements industriels où une solution rapide est nécessaire. [14]

1.6.2 Modèles statiques vs dynamiques

Les modèles de lot sizing peuvent être classés selon l'évolution des paramètres dans le temps, en distinguant les modèles statiques et les modèles dynamiques. Les modèles statiques reposent sur l'hypothèse que les paramètres tels que la demande, les coûts et les capacités restent constants sur toute la période d'étude. Dans ce cas, une décision unique est prise pour déterminer la quantité optimale à produire ou à commander. Le modèle de la quantité économique de commande (EOQ) constitue l'exemple le plus connu de cette catégorie. Il permet de trouver un compromis entre les coûts de stockage et les coûts de commande dans un environnement stable.

Cependant, les systèmes industriels réels sont rarement stationnaires. C'est pourquoi les modèles dynamiques ont été développés afin de prendre en compte la variabilité des paramètres au cours du temps. Dans ces modèles, l'horizon de planification est divisé en plusieurs périodes, et des décisions de production sont prises pour chacune d'elles. La demande peut varier d'une période à l'autre, ce qui rend la planification plus réaliste mais aussi plus complexe.

Le modèle de Wagner-Whitin est une référence majeure dans cette catégorie. Il propose une solution optimale pour le problème de lot sizing dynamique sans contrainte de capacité, en utilisant une approche de programmation dynamique. Les modèles dynamiques sont largement utilisés dans les systèmes de planification tels que le MRP, car ils permettent d'adapter la production aux fluctuations de la demande.

En résumé, les modèles statiques sont simples mais limités, tandis que les modèles dynamiques offrent une meilleure représentation de la réalité industrielle, au prix d'une complexité accrue.[15] [16]

1.6.3 Modèles déterministes vs stochastiques

Une autre classification importante des modèles de lot sizing repose sur la nature des données utilisées, en distinguant les modèles déterministes et les modèles stochastiques. Dans les modèles déterministes, tous les paramètres du système sont supposés connus avec certitude. Cela inclut la demande, les coûts, les délais de production et les capacités. Ce type de modèle est largement utilisé en pratique lorsque les prévisions sont fiables et que l'environnement est relativement stable.

Les modèles déterministes permettent de formuler des problèmes d'optimisation précis, souvent résolus à l'aide de méthodes exactes telles que la programmation linéaire en nombres entiers. Le modèle CLSP (Capacitated Lot Sizing Problem) est un exemple typique de modèle déterministe utilisé dans les environnements industriels.

En revanche, les modèles stochastiques prennent en compte l'incertitude inhérente aux systèmes réels, notamment en ce qui concerne la demande ou les délais. Dans ce cas, les paramètres sont modélisés comme des variables aléatoires suivant des distributions de probabilité. Cela permet de mieux représenter les fluctuations de la demande et les imprévus.

Les modèles stochastiques sont plus réalistes, mais aussi plus complexes à résoudre. Ils nécessitent souvent des approches spécifiques telles que la programmation stochastique, les simulations ou les méthodes heuristiques. L'objectif est généralement de minimiser le coût attendu ou de réduire les risques de

rupture.

Ainsi, le choix entre un modèle déterministe et stochastique dépend du niveau d'incertitude du système étudié et de la disponibilité des données. [17]
[16]

1.6.4 Modèles mono-produit vs multi-produits

Les modèles de lot sizing peuvent également être classés selon le nombre de produits considérés, en distinguant les modèles mono-produit et les modèles multi-produits. Les modèles mono-produit concernent la planification de la production d'un seul article sur un horizon donné. Ils sont généralement plus simples à analyser et à résoudre, car ils ne prennent pas en compte les interactions entre différents produits.

Ces modèles sont souvent utilisés comme base théorique pour développer des méthodes de résolution. Le modèle de Wagner-Whitin ou encore le modèle EOQ sont des exemples classiques de modèles mono-produit. Ils permettent de comprendre les principes fondamentaux du lot sizing.

En revanche, les modèles multi-produits prennent en compte plusieurs articles à produire simultanément. Dans ce cas, les produits partagent souvent des ressources communes, telles que les machines ou la main-d'œuvre, ce qui introduit des contraintes supplémentaires. Il devient alors nécessaire de coordonner les décisions de production entre les différents produits.

Les modèles multi-produits sont plus réalistes, notamment dans les environnements industriels comme l'agroalimentaire ou la métallurgie. Cependant, ils sont également plus complexes, car ils impliquent un nombre plus important de variables et de contraintes. Le problème CLSP multi-produits est un exemple typique de ce type de modèle.

Ces modèles nécessitent souvent l'utilisation de méthodes avancées telles que les heuristiques, les métaheuristiques ou la programmation mathématique. [18]

1.6.5 Modèles capacitaires vs non capacitaires

Enfin, les modèles de lot sizing peuvent être classés selon la prise en compte des contraintes de capacité, en distinguant les modèles capacitaires et non capacitaires. Les modèles non capacitaires supposent que les ressources de production sont illimitées. Cela signifie que toute la demande peut être satisfaite sans contrainte liée aux machines ou à la main-d'œuvre. Ces modèles sont plus simples et permettent d'obtenir des solutions optimales avec des méthodes exactes.

Le modèle de Wagner-Whitin est un exemple typique de modèle non capacitaire. Il permet de déterminer les quantités optimales à produire sans se soucier des limitations de capacité. Cependant, cette hypothèse est rarement vérifiée dans les systèmes industriels réels.

Les modèles capacitaires, en revanche, intègrent explicitement les limitations des ressources de production. Cela inclut les contraintes de temps machine, de main-d'œuvre ou de disponibilité des équipements. Ces contraintes rendent le problème plus complexe, car il devient nécessaire d'allouer efficacement les ressources entre différentes périodes et différents produits.

Le modèle CLSP (Capacitated Lot Sizing Problem) est l'un des modèles les plus étudiés dans cette catégorie. Il est largement utilisé pour représenter les systèmes de production réels, où les ressources sont limitées.

Les modèles capacitaires sont plus réalistes, mais leur résolution est souvent difficile. Ils nécessitent des approches avancées telles que la programmation linéaire en nombres entiers, les heuristiques ou les algorithmes de décomposition.

En conclusion, le choix entre un modèle capacitaire et non capacitaire dépend du niveau de réalisme souhaité et de la complexité acceptable du modèle. [19]

1.7 Méthodes de résolution d'un problème de lot sizing

Le problème de lot sizing peut être traité par plusieurs méthodes, en fonction de sa taille et de son niveau de complexité. Les méthodes exactes, comme

la programmation linéaire en nombres entiers, permettent de trouver des solutions optimales, mais elles deviennent difficiles à utiliser lorsque le problème est très grand. À l'inverse, les heuristiques, comme la méthode de Silver-Meal ou celle du Part-Period Balancing, donnent des solutions proches de l'optimal en un temps de calcul plus court. Enfin, les métaheuristiques, telles que les algorithmes génétiques ou la recherche tabou, sont mieux adaptées aux situations industrielles complexes, car elles offrent un bon équilibre entre la qualité des solutions obtenues et le temps nécessaire pour les calculer.

1.7.1 Méthodes exactes

Les méthodes exactes occupent une place fondamentale dans la résolution du problème de lot sizing, car elles permettent d'obtenir des solutions optimales en tenant compte de l'ensemble des contraintes du système de production. Parmi ces approches :

la programmation linéaire en nombres entiers (MILP) :

la plus largement utilisée, car elle offre une modélisation rigoureuse des décisions de production, de stockage et de lancement des lots, tout en intégrant des contraintes telles que les capacités, les délais et les coûts fixes. Ces modèles peuvent être résolus à l'aide de solveurs performants, mais leur complexité augmente rapidement avec la taille du problème, ce qui limite leur applicabilité aux instances de grande dimension. La Résolution avec des solveurs comme CPLEX, Gurobi, ou via PuLP.

Programmation dynamique :

une méthode exacte importante, particulièrement adaptée aux problèmes mono-produit sur horizon fini, en exploitant le principe d'optimalité pour décomposer le problème en sous-problèmes plus simples

1.7.2 Méthodes heuristiques

Elles donnent des solutions rapides mais pas forcément optimales. parmi ces méthodes : [20]

Heuristique de Silver-Meal :

L'heuristique de Silver-Meal repose sur le principe de la minimisation du coût moyen par période.

L'algorithme calcule le coût total (lancement + possession) pour couvrir les besoins de T périodes, puis divise ce total par T . On incrémente le nombre de périodes couvertes T jusqu'à ce que le coût moyen par période commence à augmenter.

Heuristique de Least Unit Cost (LUC) :

Contrairement à Silver-Meal qui divise par le nombre de périodes, l'heuristique LUC cherche à minimiser le coût moyen par unité produite (ou commandée).

L'algorithme accumule les demandes futures dans un même lot tant que le coût total rapporté à la quantité totale du lot diminue.

Part-Period Balancing (PPB) :

Aussi connue sous le nom d'algorithme de Groff ou méthode des périodes de couverture, cette heuristique repose sur une propriété fondamentale du modèle classique de Wilson (EOQ) : le coût optimal est atteint lorsque le coût de lancement est approximativement égal au coût de possession. L'algorithme tente de regrouper les demandes dans un lot jusqu'à ce que le coût cumulé de possession se rapproche le plus possible du coût fixe de lancement S .

1.7.3 Métaheuristiques

Algorithme génétique (GA) :

Un algorithme génétique (AG) est une méthode d'optimisation inspirée de la théorie de l'évolution de Darwin. Il est utilisé pour résoudre des problèmes complexes où les méthodes classiques sont difficiles à appliquer.

L'idée est de faire évoluer une population de solutions possibles vers une meilleure solution, en utilisant des mécanismes similaires à la sélection naturelle :

- Sélection : les meilleures solutions sont choisies
- Croisement (crossover) : combinaison de deux solutions
- Mutation : modification aléatoire d'une solution [21]

Recherche tabou (Tabu Search) :

La Recherche Tabou (Tabu Search) est une métaheuristique d'optimisation utilisée pour résoudre des problèmes combinatoires difficiles , surtout lorsque les méthodes exactes deviennent trop coûteuses.

La recherche tabou améliore une solution en explorant son voisinage, mais elle évite de revenir en arrière ou de répéter les mêmes solutions grâce à une mémoire appelée liste tabou.

Contrairement à une recherche locale classique, elle accepte parfois des solutions moins bonnes pour éviter les optima locaux. [22]

Recuit simulé (Simulated Annealing) :

Le Recuit simulé (Simulated Annealing) est une métaheuristique d'optimisation inspirée du processus de refroidissement des métaux en métallurgie. Il est utilisé pour résoudre des problèmes complexes où l'espace de recherche est grand et rempli d'optima locaux.

L'algorithme imite le comportement d'un métal chauffé puis refroidi lentement :

Au début (température élevée) —exploration large, même des mauvaises solutions sont acceptées À la fin (température basse) —recherche plus stricte

autour des bonnes solutions

Cela permet d'éviter de rester bloqué dans un optimum local. [23]

1.8 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter un ensemble de concepts et d'approches théoriques essentiels à la compréhension du problème de dimensionnement des lots dans un contexte industriel. À travers cette revue de littérature, il apparaît clairement que la gestion de la production et des stocks constitue un levier stratégique pour améliorer la performance globale des entreprises, notamment dans le secteur agroalimentaire où la diversité des produits et les contraintes opérationnelles sont particulièrement marquées.

Nous avons d'abord introduit les notions fondamentales liées à la logistique et à la supply chain, en mettant en évidence leur rôle dans la coordination des flux physiques et informationnels. Ensuite, nous avons abordé les principes de la planification de la production, en distinguant ses différents niveaux et en soulignant l'importance d'une gestion efficace des ressources disponibles.

Par la suite, une attention particulière a été portée à la gestion des stocks, en analysant les différents types de stocks ainsi que les coûts qui leur sont associés. Cette analyse a permis de mieux comprendre les enjeux liés à l'équilibre entre disponibilité des produits et minimisation des coûts, qui constitue le cœur du problème de lot sizing.

Nous avons également étudié les différents modèles de dimensionnement des lots proposés dans la littérature, allant des modèles classiques tels que l'EOQ et le modèle de Wagner-Whitin, jusqu'aux approches plus avancées intégrant des contraintes réalistes. Cette diversité de modèles met en évidence l'évolution des méthodes de résolution face à la complexité croissante des systèmes de production.

Dans ce cadre, le modèle du Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP) s'impose comme une référence incontournable pour la modélisation des systèmes de production multi-produits avec contraintes de capacité. Il permet de représenter de manière fidèle les situations industrielles réelles, en intégrant simultanément

les décisions de production, de stockage et de planification des ressources.

Par ailleurs, les différentes méthodes de résolution présentées, qu'elles soient exactes ou heuristiques, montrent qu'il existe plusieurs approches pour traiter ce type de problème, chacune présentant des avantages et des limites selon le contexte d'application et la taille du problème étudié.

Ainsi, cette revue de littérature a permis de mettre en évidence les principaux outils théoriques et méthodologiques nécessaires à l'étude du problème de lot sizing. Elle a également permis de justifier le choix du modèle CLSP comme cadre d'analyse pour ce travail, en raison de sa pertinence par rapport aux caractéristiques de l'entreprise étudiée.

Enfin, ce chapitre constitue une base solide pour la suite du mémoire. Les éléments présentés serviront de fondement pour la formulation du modèle mathématique qui sera développé dans le 3ème chapitre, où une adaptation du CLSP au contexte spécifique de l'entreprise sera proposée afin d'optimiser la planification de la production.

CHAPITRE 2

ENTREPRISE DELICIAS

2.1 Introduction

La mise en œuvre d'un modèle de planification de la production nécessite une connaissance approfondie du contexte industriel dans lequel il s'inscrit. Avant toute modélisation mathématique, il convient d'analyser l'organisation productive de l'entreprise, ses ressources, ses contraintes opérationnelles et la nature de sa demande. Cette étape de collecte et de structuration des données constitue le fondement sur lequel reposera l'ensemble du travail d'optimisation. Ce chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise Delicias, société agroalimentaire implantée à Tlemcen, ainsi qu'à la description détaillée de son système de production. Dans un premier temps, nous présenterons l'entreprise, sa gamme de produits et son organisation interne. Nous décrirons ensuite le système de production, les équipements disponibles et le flux de fabrication. Enfin, nous exposerons les données collectées sur le terrain — capacités, demandes, stocks et coûts — qui alimenteront directement le modèle de dimensionnement de lots développé au chapitre suivant.

2.2 Présentation de l'entreprise

2.2.1 Historique et évolution

L'entreprise Delicias est une société agroalimentaire algérienne fondée il y a environ deux ans et dont le siège de production principal est situé à Tlemcen. Malgré sa création récente, elle a su s'imposer progressivement sur le marché régional grâce à une stratégie fondée sur la qualité de fabrication, la diversification de sa gamme et l'élargissement continu de sa zone commerciale.

L'activité principale de Delicias repose sur la fabrication, le conditionnement et la distribution de produits alimentaires transformés destinés à une clientèle composée de grossistes, de supérettes et d'épicerie de détail répartis dans plusieurs wilayas de l'Ouest algérien. La société opère sur **deux sites de production** : le site principal, consacré au conditionnement des vinaigres, et de l'eau de fleur et un second site spécialisé dans la fabrication des tortillas des produits en poudre.



FIGURE 2.1 – Entreprise delicias

2.2.2 Organisation générale

Delicias est une PME à structure organisationnelle relativement simple et centralisée. L'organigramme fonctionnel peut être structuré autour des services suivants :

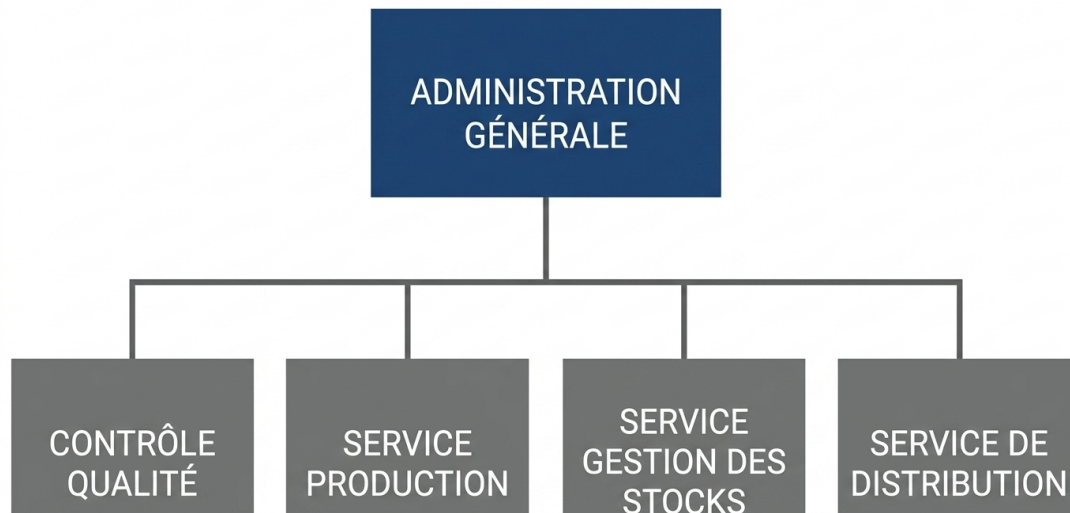


FIGURE 2.2 – Organigramme de Delicias

2.3 Structure logistique et zone de distribution

2.3.1 Infrastructure logistique

L'entreprise fonctionne avec :

- Deux sites de production;
- Un espace de stockage des produits finis;
- Une flotte composée de trois véhicules utilitaires de type fourgonnette.

Les produits finis sont stockés avant expédition vers les différents points de vente répartis dans plusieurs wilayas.

2.3.2 Zone géographique desservie

Delicias distribue ses produits principalement dans la région Ouest de l'Algérie, couvrant les wilayas suivantes :

- Tlemcen et ses environs
- Aïn Témouchent et ses environs, Sidi Bel Abbès et ses environs, Oran, Saïda, Mostaganem, Aïn Sefra, Méchria

Cette dispersion géographique implique des distances importantes entre le dépôt central et certains points de livraison, ce qui rend la planification des tournées particulièrement stratégique.



FIGURE 2.3 – Zone géographique desservie

2.4 Gamme de produits

Les produits fabriqués par Delicias se répartissent en trois familles distinctes, chacune associée à une ligne de production spécifique :

TABLE 2.1 – Gamme de produits Delicias et ligne de production associée

Famille	Produit	Code	Ligne
Vinaigres (liquides)	Vinaigre Citron Jaune	CJaune	M1 (Site 1)
	Vinaigre Citron Blanc	CBlanc	M1 (Site 1)
	Vinaigre Raisin	Raisin	M1 (Site 1)
	Vinaigre Pomme	Pomme	M1 (Site 1)
	Vinaigre Olive	Olive	M1 (Site 1)
Conditionnés spéciaux	Vinaigre Balsamique	Balsa	M2 (Site 1)
	Vinaigre 7 Degrés	7deg	M2 (Site 1)
	Vinaigre 3L	3L	M2 (Site 1)
	Vapo	Vapo	M2 (Site 1)
	Eau de fleur EDF	EDF	M2 (Site 1)
Poudres alimentaires	Vanille, Chantilly, Bicarbonate	—	Site 2
Snacking	Tortillas pour tacos	—	Site 2

Dans le cadre de cette étude, l'analyse se concentre sur les **dix produits liquides** des lignes M1 et M2, qui constituent le cœur de l'activité de conditionnement et représentent la part la plus significative du chiffre d'affaires de l'entreprise.

		
Vinaigre 4°	Vinaigre 7°	Vinaigre 10°
		
Vinaigre balsamique	Eau de fleur	Bicarbonette
		
Vanille	Chantilly	Tortilla

TABLE 2.2 – Gamme de produits Delicias

Cette diversification permet à l'entreprise de répondre à différents segments de marché et d'augmenter son chiffre d'affaires par la multiplication des références.

2.5 Système de Production

2.5.1 Description des équipements

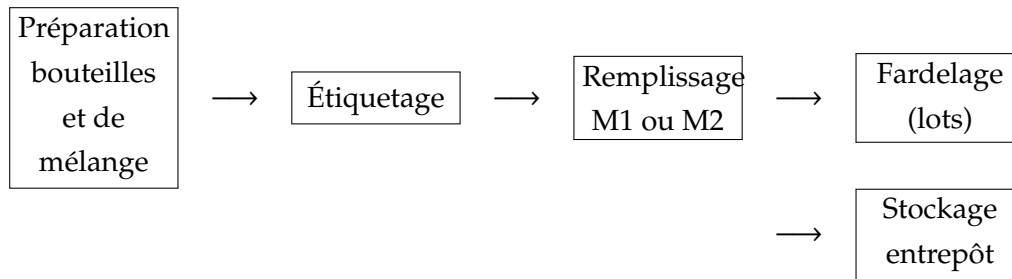
Le site principal de production dispose des équipements suivants, tous regroupés sur un même espace de travail :

TABLE 2.3 – Équipements du site de production 1

Équipement	Description	Rôle dans le flux
Ligne M1	4 bacs semi-automatisés	Conditionnement des vinaigres aromatisés (CJaune, CBlanc, Raisin, Pomme, Olive)
Ligne M2	2 bacs manuels	Conditionnement des produits spéciaux (Balsa, 7deg, 3L, Vapo, EDF)
Machine étiqueteuse	1 machine dédiée (unique)	Pose des étiquettes sur les bouteilles avant remplissage
Machine fardeleuse	1 machine dédiée (unique)	Regroupement des bouteilles en fardeaux (lots de vente)

2.5.2 Flux de production

Le processus de fabrication des produits liquides (vinaigres et eau de fleur) suit un enchaînement d'étapes séquentielles, schématisé ci-dessous :



Chaque étape mobilise une fraction de l'effectif disponible. La phase de remplissage (M1 ou M2) est la plus intensive en temps et constitue le cœur du processus de conditionnement.

2.5.3 Organisation de la main-d'œuvre

L'entreprise fonctionne avec un effectif restreint, réparti comme suit :

TABLE 2.4 – Répartition des opérateurs par poste

Poste	Nombre	Rôle
Opérateur étiqueteuse	2	Conduit la machine étiqueteuse en continu
Opérateur ligne (M1 ou M2)	1	Assure le remplissage sur M1 ou M2 selon le produit planifié — ne peut pas opérer les deux simultanément
Opérateurs manutention	2	Préparent les bouteilles après le remplissage et assurent le stockage des fardeaux après la fardeuse
Opérateur fardeuse	1	Conduit la machine fardeuse en continu et assure le conditionnement des bouteilles en fardeaux
Total	5	Effectif permanent du site 1

2.5.4 Temps de cycle et changements de série

Chaque produit nécessite un temps de production par lot, qui dépend du format de conditionnement et de la ligne utilisée. Les temps de changement de série correspondent au nettoyage de la ligne entre deux produits différents. Cette opération, réalisée manuellement par l'opérateur, consiste en un rinçage à l'eau et à des produits nettoyants courants. Sa durée dépend de la cadence de l'opérateur au moment du changement, mais est estimée en moyenne à :

TABLE 2.5 – Temps de cycle et de changement de série par ligne

Ligne	Produits	Temps de cycle (min/lot)	Changement de série (min)
M1	CJaune, CBlanc, Raisin, Pomme, Olive	60 (identique)	5
M2	Balsa, 7deg, 3L, Vapo, EDF	168 à 210 (variable)	10

La ligne M2, étant entièrement manuelle, présente des temps de cycle plus longs et des changements de série plus importants que la ligne M1 semi-automatisée.

2.6 Système de Stockage

2.6.1 Organisation de l'entrepôt

Les produits finis sont stockés dans un espace dédié attenant au site de production. Le stockage est organisé sur des **palettes posées au sol**, chaque palette occupant un emplacement fixe et identifié. Ce mode d'organisation permet une traçabilité simple des références et facilite les opérations de chargement pour la distribution.

La capacité de l'entrepôt est physiquement limitée par le nombre d'emplacements palette disponibles. Cette contrainte spatiale est directement intégrée dans le modèle d'optimisation sous la forme d'une borne supérieure sur le nombre total de palettes occupées à tout moment

2.6.2 Capacité de stockage par produit

Chaque produit occupe un nombre de fardeaux par palette qui dépend de son format de conditionnement. Ces valeurs, relevées sur le terrain, sont présentées dans le tableau suivant :

TABLE 2.6 – Capacité de stockage par palette (F_i) et stock de sécurité (SS_i)

Produit	Ligne	F_i (fardeaux/palette)	SS_i (fardeaux)
Citron Jaune (CJaune)	M1	120	60
Citron Blanc (CBlanc)	M1	120	120
Raisin	M1	120	60
Pomme	M1	120	60
Olive	M1	120	60
Balsamique (Balsa)	M2	144	10
7 Degrés (7deg)	M2	108	54
3L	M2	108	20
Vapo	M2	48	20
EDF	M2	108	54

Le stock de sécurité SS_i représente le niveau minimum de stock que l'entreprise souhaite maintenir pour chaque produit afin de faire face aux aléas de la demande. Pour CBlanc, ce niveau est fixé à 120 fardeaux (une palette complète), reflétant la forte et régulière demande observée sur ce produit tout au long de l'année.

2.7 Approvisionnement en Matières Premières

L'entreprise s'approvisionne auprès de fournisseurs à la fois locaux et nationaux selon la disponibilité et les prix pratiqués sur le marché. Les matières premières principales comprennent le vinaigre en vrac, les essences aromatiques, les bouteilles en plastique, les bouchons, les étiquettes ainsi que les films d'emballage pour le fardeleuse.

L'absence de fournisseurs exclusivement locaux pour certaines matières premières implique des délais d'approvisionnement variables, ce qui renforce la nécessité de maintenir des stocks tampons pour ne pas interrompre la production.

2.8 Analyse de la Demande

2.8.1 Mode de collecte et de prévision

La demande des produits Delicias est alimentée par deux canaux complémentaires :

1. **Tournées commerciales.** L'entreprise dispose de trois fourgons qui sillonnent régulièrement les wilayas de la région Ouest. Lors de ces tournées, les chauffeurs-vendeurs proposent les produits directement aux points de vente (épiceries, supérettes, grossistes). La commande est passée sur place selon les besoins du client au moment de la visite : certains clients achètent, d'autres non. Ce mode de vente génère une demande partiellement aléatoire et difficile à anticiper à court terme.
2. **Commandes directes.** Certains clients réguliers, notamment les grossistes et quelques grandes surfaces, passent des commandes fermes à l'avance. Ces commandes constituent une base de demande plus prévisible et permettent à l'entreprise d'organiser sa production en conséquence.

Pour la planification annuelle, l'entreprise établit des **prévisions de ventes** en s'appuyant sur les historiques de commandes et les données de tournées des années précédentes. Ces prévisions, affinées par le responsable commercial.

2.8.2 Saisonnalité de la demande

La demande des produits Delicias présente une **saisonnalité marquée**, principalement liée au calendrier religieux et aux habitudes de consommation algériennes. Deux périodes se distinguent nettement :

—Le mois de Ramadan et le mois qui le précède :

la consommation de vinaigre, d'eau de fleur et de produits alimentaires conditionnés augmente sensiblement durant cette période. Les ménages et les commerces s'approvisionnent plus abondamment, ce qui se traduit par des pics de demande importants sur l'ensemble de la gamme M1 et M2. Dans l'horizon étudié (Mai 2026 – Avril 2027), le Ramadan tombe en Fév.–Mar. 2027, avec un pic anticipé dès Jan. 2027.

—Conséquence pour la production :

ces mois requièrent une mobilisation maximale de la capacité de l'opérateur. C'est pourquoi le modèle intègre des **heures supplémentaires** (+25 % de capacité) sur Fév. et Mar. 2027 afin de répondre à cette hausse de la demande sans rupture de stock.

2.9 Identification du Problème de Planification

2.9.1 Système de planification actuel

À ce stade de son développement, l'entreprise Delicias ne dispose pas d'un outil formalisé de planification de la production. Les décisions de lancement des lots sont prises de manière empirique par le responsable de production, sur la base de son expérience et de l'observation des niveaux de stock. Cette approche, adaptée aux premiers mois d'activité, montre ses limites à mesure que la gamme s'élargit et que la demande se complexifie :

- **Risque de rupture de stock** en période de forte demande (Ramadan, commandes groupées), faute d'anticipation suffisante de la production.

- **Sous-utilisation de la capacité** certains mois, suivie d’une saturation les mois suivants, générant un flux de production irrégulier.
- **Gestion intuitive de l’entrepôt** : l’espace palette est parfois saturé sur certaines références tandis que d’autres emplacements restent inoccupés.
- **Absence de critère d’arbitrage** entre M1 et M2 lorsque la capacité de l’opérateur est limitée et que plusieurs produits sont à produire simultanément.

2.9.2 Justification du recours à l’optimisation

L’ensemble de ces constats met en évidence la nécessité d’un outil de planification structuré, capable de déterminer, pour chaque mois et chaque produit, le nombre optimal de lots à produire. Un tel outil doit prendre en compte simultanément les contraintes de capacité de l’opérateur, les limitations de stockage, les niveaux de stock de sécurité et les prévisions de demande sur l’ensemble de l’horizon de planification.

C’est précisément l’objet du **modèle de dimensionnement de lots** (*Lot Sizing*) développé au chapitre suivant. Ce modèle, formulé comme un programme linéaire en nombres entiers purs, intègre l’ensemble des données collectées dans ce chapitre pour produire un plan de production optimal sur douze mois, garantissant la satisfaction de la demande tout en respectant les contraintes physiques et humaines de l’entreprise.

2.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un portrait complet du système productif de l’entreprise Delicias dans l’optique de la planification de la production. L’analyse a mis en évidence plusieurs caractéristiques structurantes : deux lignes de conditionnement complémentaires (M1 semi-automatisée et M2 manuelle), un effectif réduit concentrant la contrainte de capacité sur un seul opérateur de ligne, un entrepôt organisé en emplacements palettes fixes, et une demande saisonnière marquée par les pics du Ramadan. L’ensemble des données collectées sur le terrain — temps de cycle, capacités, stocks initiaux, niveaux de sécurité,

prévisions de demande et données économiques — constitue le jeu de paramètres complet qui alimentera le modèle mathématique présenté au chapitre suivant. La formalisation de ces données dans un programme d'optimisation permettra de dépasser les limites de la planification empirique actuelle et de proposer à l'entreprise un outil d'aide à la décision fiable et opérationnel.

FORMULATION ET RÉOLUTION DU MODÈLE

3.1 Introduction

Après avoir posé les fondements théoriques du problème de dimensionnement des lots et présenté en détail le système productif de l'entreprise **Delicias**, ce troisième chapitre constitue le cœur opérationnel de ce travail : la formulation mathématique et la résolution du modèle d'optimisation. L'objectif est de traduire les contraintes réelles de l'entreprise en un programme linéaire en nombres entiers, capable de produire un plan de production optimal sur un horizon de douze mois.

L'entreprise **Delicias**, rappelons-le, gère dix produits répartis sur deux lignes de conditionnement distinctes, avec un opérateur unique représentant le principal goulot d'étranglement du système. En l'absence de tout outil formalisé de planification, les décisions de lancement des lots reposaient jusqu'ici sur l'expérience du responsable de production, exposant l'entreprise à des risques de rupture de stock, de surcharge capacitaire et de mauvaise gestion de l'entrepôt.

Pour remédier à ces dysfonctionnements, nous proposons un modèle de type **CLSP** (Capacitated Lot Sizing Problem), formulé en programmation linéaire en nombres entiers purs et résolu à l'aide de la bibliothèque Python **PuLP**, couplée au solveur open source **CBC**. Le modèle intègre simultanément les contraintes de capacité opérateur, les limitations de stockage en palettes, les niveaux de stock de sécurité, la saisonnalité liée au Ramadan ainsi que les prévisions de demande mensuelle pour chacun des dix produits. Une interface graphique

développée sous **CustomTkinter** complète l'outil, permettant une utilisation pratique et interactive par les responsables de l'entreprise.

3.2 Définition du problème

À ce stade de son développement, l'entreprise Delicias ne dispose pas d'un outil formalisé de planification de la production. Les décisions de lancement des lots sont prises de manière empirique par le responsable de production, sur la base de son expérience et de l'observation des niveaux de stock. Bien que cette approche ait été adaptée aux premiers mois d'activité, elle montre aujourd'hui ses limites avec l'élargissement de la gamme de produits et la complexification de la demande.

En effet, cette gestion intuitive engendre plusieurs dysfonctionnements majeurs : un risque accru de rupture de stock lors des périodes de forte demande (Ramadan, commandes groupées), une sous-utilisation de la capacité de production certains mois suivie de périodes de saturation, ainsi qu'une gestion inefficace de l'entrepôt où certaines références saturer les espaces de stockage tandis que d'autres restent sous-exploitées. À cela s'ajoute l'absence de critères objectifs pour arbitrer entre les produits M1 et M2 lorsque la capacité de l'opérateur est limitée et que plusieurs produits doivent être fabriqués simultanément.

L'ensemble de ces constats met en évidence la nécessité de mettre en place un outil de planification structuré, capable de déterminer, pour chaque mois et chaque produit, le nombre optimal de lots à produire. Cet outil doit intégrer simultanément les contraintes de capacité des ressources humaines, les limitations de stockage, les niveaux de stock de sécurité ainsi que les prévisions de demande sur l'ensemble de l'horizon de planification. C'est précisément l'objet du modèle de dimensionnement de lots (Lot Sizing), formulé comme un programme linéaire en nombres entiers purs, qui sera développé dans le chapitre suivant afin de produire un plan de production optimal sur douze mois, garantissant la satisfaction de la demande tout en respectant les contraintes physiques et opérationnelles de l'entreprise.

3.3 Modèle Mathématique

3.3.1 Ensembles

Symbole	Description
$\mathcal{P}$	Ensemble de tous les produits, $\mathcal{P} = \mathcal{I}_1 \cup \mathcal{I}_2$, $ \mathcal{P} = 10$
$\mathcal{I}_1$	Produits de la ligne M1 : $\{\text{CJaune, CBlanc, Raisin, Pomme, Olive}\}$, $ \mathcal{I}_1 = 5$
$\mathcal{I}_2$	Produits de la ligne M2 : $\{\text{Balsa, 7deg, 3L, Vapo, EDF}\}$, $ \mathcal{I}_2 = 5$
$\mathcal{T}$	Horizon de planification mensuel, $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, 12\}$
$\mathcal{T}_R$	Mois avec heures supplémentaires (Ramadan) : $\mathcal{T}_R = \{10, 11\}$ (Février 2027 et Mars 2027)

3.3.2 Paramètres

Symbole	Unité	Description
B_i	fardos/lot	Taille d'un lot (fardos par préparation) pour le produit i
$D_{i,t}$	fardos	Demande du produit i au mois t
$I_{i,0}$	fardos	Stock initial du produit i (début de l'horizon)
SS_i	fardos	Niveau de stock de sécurité cible pour le produit i
F_i	fardos/palette	Capacité d'une palette pour le produit i
$P_{\max}$	palettes	Nombre maximum d'emplacements palettes en entrepôt
W	min/jour	Durée journalière de travail disponible (420 min)
J_t	jours	Nombre de jours ouvrés au mois t
α	–	Taux d'heures supplémentaires Ramadan ($\alpha \in [0, 1]$, 0.25)
τ^{M1}	min/lot	Temps de production d'un lot sur M1 (60 min)
τ_i^{M2}	min/lot	Temps de production d'un lot sur M2 pour le produit i
S^{M1}	min	Temps de changement de série sur M1 (5 min)
S^{M2}	min	Temps de changement de série sur M2 (10 min)
m_i	DA/fardo	Marge unitaire du produit i
π	DA/fardo	Pénalité par unité de demande non satisfaite
μ	DA/fardo	Pénalité par déficit de stock de sécurité ($\mu \ll \pi$)

3.3.3 Capacité effective par mois

La capacité totale de l'opérateur unique au mois t (en minutes) est :

$$C_t = \begin{cases} W \cdot J_t \cdot (1 + \alpha) & \text{si } t \in \mathcal{T}_R \text{ (Ramadan)} \\ W \cdot J_t & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3.3.1)$$

3.3.4 Variables de décision

Variable	Domaine	Description
$N_{i,t}^{M1}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Nombre de lots produits sur M1 pour le produit $i \in \mathcal{I}_1$ au mois t
$N_{i,t}^{M2}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Nombre de lots produits sur M2 pour le produit $i \in \mathcal{I}_2$ au mois t
$X_{i,j,t}^{M1}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Nombre de changements de série de i vers j sur M1 au mois $t, i \neq j, i, j \in \mathcal{I}_1$
$X_{i,j,t}^{M2}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Nombre de changements de série de i vers j sur M2 au mois $t, i \neq j, i, j \in \mathcal{I}_2$
$I_{i,t}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Stock en fin de mois t pour le produit i (fardos entiers)
$q_{i,t}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Quantité vendue du produit i au mois t (fardos entiers)
$r_{i,t}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Rupture de stock : demande non satisfaite du produit i au mois t
$s_{i,t}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Déficit de stock de sécurité du produit i au mois t ($s_{i,t} = \max(0, SS_i - I_{i,t})$)
$p_{i,t}$	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Nombre de palettes occupées par le stock du produit i en fin de mois t

On définit la quantité produite au mois t pour le produit i :

$$\text{prod}_{i,t} = \begin{cases} B_i \cdot N_{i,t}^{M1} & \text{si } i \in \mathcal{I}_1 \\ B_i \cdot N_{i,t}^{M2} & \text{si } i \in \mathcal{I}_2 \end{cases} \quad (3.3.4.1)$$

et le stock disponible en début de mois :

$$SD_{i,t} = \begin{cases} I_{i,0} & \text{si } t = 1 \\ I_{i,t-1} & \text{si } t \geq 2 \end{cases} \quad (3.3.4.2)$$

3.3.5 Fonction objectif

Le modèle maximise la marge nette sur l'horizon complet, définie comme la marge brute sur les ventes réalisées, diminuée de la pénalité pour ruptures de stock et de la pénalité légère pour déficit de stock de sécurité :

$$\max Z = \underbrace{\sum_{i \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} m_i \cdot q_{i,t}}_{\text{Marge brute sur ventes}} - \underbrace{\pi \sum_{i \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} r_{i,t}}_{\text{Pénalité ruptures}} - \underbrace{\mu \sum_{i \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} s_{i,t}}_{\text{Pénalité stock sécu}} \quad (3.3.5.1)$$

Remarque : La hiérarchie des pénalités est fondamentale : $\mu \ll \pi$. Ainsi, le modèle satisfera toujours la demande avant de chercher à maintenir le stock de sécurité.

3.3.6 Contraintes

(C1) — Bilan de stock

Pour tout produit $i \in \mathcal{P}$ et tout mois $t \in \mathcal{T}$:

$$SD_{i,t} + \text{prod}_{i,t} = q_{i,t} + I_{i,t} \quad (3.3.6.1)$$

Le stock de début de période augmenté de la production est entièrement affecté soit aux ventes soit au stock de fin de période.

(C2) — Équilibre demande / ventes / ruptures

Pour tout $i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}$:

$$q_{i,t} + r_{i,t} = D_{i,t} \quad (3.3.6.2)$$

La demande est intégralement comptabilisée : soit elle est satisfaite ($q_{i,t}$), soit elle constitue une rupture pénalisée ($r_{i,t}$).

(C3) — Contrainte de disponibilité physique

Pour tout $i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}$:

$$q_{i,t} \leq SD_{i,t} + \text{prod}_{i,t} \quad (3.3.6.3)$$

On ne peut vendre que ce qui est physiquement disponible (stock de début + production du mois). Cette contrainte, combinée à (3.3.6.1) et (3.3.6.2), garantit $I_{i,t} \geq 0$ et empêche tout manque fictif.

(C4) — Stock de sécurité souple

Pour tout $i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}$, le déficit de stock de sécurité $s_{i,t}$ mesure l'écart négatif par rapport au niveau cible SS_i :

$$s_{i,t} \geq SS_i - I_{i,t} \quad (3.3.6.4)$$

$$s_{i,t} \leq SS_i \quad (3.3.6.5)$$

Combinées à $s_{i,t} \geq 0$, ces deux inégalités donnent :

$$s_{i,t} = \max(0, SS_i - I_{i,t})$$

Il n'y a **pas de contrainte dure** sur le stock de sécurité : le non-respect est autorisé mais pénalisé dans l'objectif, ce qui garantit que la livraison reste toujours prioritaire.

(C5) — Capacité de l'opérateur unique

Les deux lignes M1 et M2 tournent en parallèle, mais un opérateur unique les supervise. Sa capacité totale est partagée entre les deux lignes. Pour tout $t \in \mathcal{T}$:

$$\underbrace{\tau^{M1} \sum_{i \in I_1} N_{i,t}^{M1} + S^{M1} \sum_{\substack{i,j \in I_1 \\ i \neq j}} X_{i,j,t}^{M1}}_{\text{Temps M1 au mois } t} + \underbrace{\sum_{i \in I_2} \tau_i^{M2} \cdot N_{i,t}^{M2} + S^{M2} \sum_{\substack{i,j \in I_2 \\ i \neq j}} X_{i,j,t}^{M2}}_{\text{Temps M2 au mois } t} \leq C_t \quad (3.3.6.6)$$

où C_t est défini par l'équation (3.3.3.1).

(C6) — Cohérence des changements de série sur M1

Les changements de série ne peuvent survenir qu'entre des lots effectivement produits. Pour tout $i \in I_1, t \in \mathcal{T}$:

$$\sum_{\substack{j \in I_1 \\ j \neq i}} X_{i,j,t}^{M1} \leq N_{i,t}^{M1} \quad (3.3.6.7)$$

$$\sum_{\substack{j \in I_1 \\ j \neq i}} X_{j,i,t}^{M1} \leq N_{i,t}^{M1} \quad (3.3.6.8)$$

L'inégalité (3.3.6.7) borne les transitions *sortantes* de i , et (3.3.6.8) borne les transitions *entrantes* vers i .

(C7) — Cohérence des changements de série sur M2

De façon symétrique, pour tout $i \in I_2, t \in \mathcal{T}$:

$$\sum_{\substack{j \in I_2 \\ j \neq i}} X_{i,j,t}^{M2} \leq N_{i,t}^{M2} \quad (3.3.6.9)$$

$$\sum_{\substack{j \in I_2 \\ j \neq i}} X_{j,i,t}^{M2} \leq N_{i,t}^{M2} \quad (3.3.6.10)$$

(C8) — Capacité d'entreposage

Le nombre total de palettes occupées en entrepôt ne peut pas dépasser la capacité physique $P_{\max}$. Pour tout $t \in \mathcal{T}$:

$$\sum_{i \in \mathcal{P}} p_{i,t} \leq P_{\max} \quad (3.3.6.11)$$

(C9) — Calcul des palettes occupées

Le nombre de palettes occupées par le produit i au mois t est défini comme le plafond du ratio entre le stock et la capacité d'une palette F_i :

$$p_{i,t} = \left\lceil \frac{I_{i,t}}{F_i} \right\rceil \quad (3.3.6.12)$$

3.3.7 Domaines des variables

$$N_{i,t}^{M1} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{I}_1, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.1)$$

$$N_{i,t}^{M2} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{I}_2, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.2)$$

$$X_{i,j,t}^{M1} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \neq j \in \mathcal{I}_1, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.3)$$

$$X_{i,j,t}^{M2} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \neq j \in \mathcal{I}_2, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.4)$$

$$I_{i,t} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.5)$$

$$q_{i,t} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.6)$$

$$r_{i,t} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.7)$$

$$s_{i,t} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.8)$$

$$p_{i,t} \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad \forall i \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.3.7.9)$$

3.4 Données Numériques

3.4.1 Données prévisionnelles de l'entreprise

Les tableaux suivants présentent les prévisions de demande mensuelle (en fardeaux) pour chacun des dix produits sur l'horizon de planification Mai 2026 – Avril 2027, établies à partir des historiques de ventes et des observations terrain.

Ligne M1 — Vinaigres aromatisés

TABLE 3.1 – Demande prévisionnelle mensuelle — Ligne M1 (fardeaux)

Produit	Mai'26	Juin'26	Jul'26	Août'26	Sep'26	Oct'26	Nov'26	Déc'26	Jan'27	Fév'27	Mar'27	Avr'27	Total
CJaune	195	117	237	208	423	219	320	148	343	495	165	494	3 364
CBlanc	200	132	399	367	517	510	473	419	503	838	416	446	5 220
Raisin	98	263	217	191	410	277	200	251	200	522	90	353	3 072
Pomme	293	261	128	229	372	352	274	162	379	623	139	311	3 523
Olive	202	266	335	99	354	319	169	144	238	587	156	339	3 208
Total M1	988	1 039	1 316	1 094	2 076	1 677	1 436	1 124	1 663	3 065	966	1 943	18 387

Ligne M2 — Produits spéciaux

TABLE 3.2 – Demande prévisionnelle mensuelle — Ligne M2 (fardeaux)

Produit	Mai'26	Juin'26	Jul'26	Août'26	Sep'26	Oct'26	Nov'26	Déc'26	Jan'27	Fév'27	Mar'27	Avr'27	Total
Balsa	18	19	20	21	22	23	24	25	26	35	36	29	298
7deg	336	74	249	225	314	259	186	160	247	297	170	283	2 800
3L	28	63	85	61	39	107	56	31	71	53	63	90	647
Vapo	15	23	31	28	26	39	16	15	19	15	23	30	280
EDF	329	349	305	101	296	177	192	150	400	752	752	106	3 909
Total M2	726	528	690	436	697	605	474	381	763	1 152	1 044	538	8 034

Le pic de demande de Fév.–Mar. 2027 est particulièrement visible sur CBlanc (838 et 416 fardeaux) et EDF (752 fardeaux sur chacun des deux mois), confirmant la nécessité d'une planification anticipée sur ces références.

3.4.2 Paramètres de production

TABLE 3.3 – Tailles de lots B_i , capacités palette F_i , et marges m_i

Produit	Ligne	B_i	F_i	τ_i (min)	m_i (DA)
CJaune	M1	21	120	60	72
CBlanc	M1	21	120	60	72
Raisin	M1	21	120	60	72
Pomme	M1	21	120	60	72
Olive	M1	21	120	60	72
Balsa	M2	34	144	210	309
7deg	M2	38	108	168	77
3L	M2	23	108	210	52
Vapo	M2	24	48	210	156
EDF	M2	43	108	168	72

3.4.3 Capacités disponibles et stocks de sécurité

TABLE 3.4 – Jours ouvrés, capacités effectives et stocks de sécurité

Mois	t	J_t	C_t^{base} (min)	$C_t^{\text{eff.}}$ (min)	Ramadan
Mai 2026	1	20	8 400	8 400	
Juin 2026	2	21	8 820	8 820	
Juil. 2026	3	23	9 660	9 660	
Aout 2026	4	21	8 820	8 820	
Sep. 2026	5	22	9 240	9 240	
Oct. 2026	6	23	9 660	9 660	
Nov. 2026	7	20	8 400	8 400	
Déc. 2026	8	23	9 660	9 660	
Jan. 2027	9	21	8 820	8 820	
Fév. 2027	10	20	8 400	10 500	✓
Mar. 2027	11	20	8 400	10 500	✓
Avr. 2027	12	22	9 240	9 240	

Note : $\alpha = 0,25$, donc $C_t^{\text{eff.}} = 8\,400 \times 1,25 = 10\,500$ min pour les mois Ramadan.

TABLE 3.5 – Stocks initiaux $I_{i,0}$ et stocks de sécurité SS_i

Produit	$I_{i,0}$ (fardos)	SS_i (fardos)
CJaune	60	60
CBlanc	60	120
Raisin	60	60
Pomme	60	60
Olive	60	60
Balsa	10	10
7deg	54	54
3L	20	20
Vapo	20	20
EDF	54	54

3.5 Implémentation et Résolution

3.5.1 Environnement de développement

Le modèle est implémenté en **Python 3** avec les bibliothèques suivantes :

TABLE 3.6 – Outils et bibliothèques utilisés

Outil	Rôle	Version
PuLP	Modélisation PLNE, interface solveur	2.x
CBC	Solveur Branch & Cut (COIN-OR)	open source
Customtkinter	Interface utilisateur interactive	1.x
pandas	Manipulation et affichage des tableaux	2.x
matplotlib	Visualisations graphiques	3.x
openpyxl	Export des résultats en format Excel	3.x

3.5.2 Paramètres de résolution

Le solveur CBC est configuré avec un **temps limite de 300 secondes**. La solution obtenue atteint le statut **Optimal** bien avant cette limite. Les paramètres retenus pour l'instance principale sont :

Paramètre	Valeur
Pénalité rupture π	500 DA/fardo
Pénalité stock sécu μ	10 DA/fardo
Capacité entrepôt $P_{\max}$	15 palettes
Ramadan activé	Oui, +25 % sur Fév. et Mar. 2027
Statut de résolution	Optimal

3.6 PuLP : bibliothèque Python pour l’optimisation linéaire

3.6.1 Origine et contexte de développement

PuLP est une bibliothèque open source écrite en langage Python, dédiée à la modélisation et à la résolution de problèmes d’optimisation linéaire (PL) et d’optimisation linéaire en nombres entiers mixtes (PLNE). Elle a été conçue à l’origine par Stuart Mitchell, chercheur à l’Université d’Auckland, puis reprise et maintenue par la communauté internationale COIN-OR (*Computational Infrastructure for Operations Research*), un consortium académique et industriel fondé en 2000 dont la vocation est de développer des outils open source pour la recherche opérationnelle.

PuLP est distribuée sous licence MIT, l’une des licences open source les plus permissives, ce qui la rend librement utilisable dans les contextes académiques comme industriels, sans restriction de redistribution ni d’intégration dans des projets commerciaux. Elle est aujourd’hui l’une des bibliothèques d’optimisation linéaire les plus répandues dans la communauté Python, avec une base d’utilisateurs active dans les domaines de la recherche opérationnelle, de la gestion des opérations et de la planification industrielle. [24]

3.6.2 Positionnement parmi les outils d’optimisation

Il existe plusieurs familles d’outils permettant de résoudre des problèmes d’optimisation linéaire. On distingue classiquement les solveurs purs, les langages de modélisation algébrique et les bibliothèques de modélisation intégrées à des langages de programmation généralistes.

Les solveurs purs, tels que CPLEX ou Gurobi, sont des moteurs de calcul très performants mais dont l’utilisation directe nécessite une connaissance approfondie de formats de fichiers spécifiques (.lp, .mps) peu intuitifs. Les langages de modélisation algébrique dédiés, tels qu’AMPL ou GAMS, offrent une syntaxe mathématique élégante mais constituent des environnements propriétaires distincts du reste du workflow de développement.

PuLP occupe une position intermédiaire particulièrement avantageuse : il s'intègre nativement dans l'écosystème Python, permettant de combiner la modélisation d'optimisation avec l'ensemble des outils de traitement de données, de visualisation et d'automatisation disponibles en Python, sans apprentissage d'un environnement supplémentaire. Le tableau 3.7 situe PuLP par rapport aux principaux outils concurrents selon plusieurs critères pertinents. [24]

TABLE 3.7 – Comparaison de PuLP avec les principaux outils d'optimisation linéaire

Outil	Langage	Licence	Intégration Python	Solveurs multiples
PuLP	Python	Open source	Native	Oui
Pyomo	Python	Open source	Native	Oui
AMPL	Dédié	Commerciale	Via API	Oui
GAMS	Dédié	Commerciale	Via API	Oui
CPLEX	C/Java	Commerciale	Via API	Non
Gurobi	C/Java	Commerciale	Via API	Non
SciPy linprog	Python	Open source	Native	Non

3.6.3 Architecture interne de PuLP

L'architecture de PuLP repose sur une séparation nette entre deux couches fonctionnelles : la couche de modélisation et la couche de résolution. Cette conception, inspirée du principe de séparation des responsabilités (*separation of concerns*), confère à la bibliothèque une grande modularité et une flexibilité d'usage importante.

La couche de modélisation

La couche de modélisation est entièrement gérée par PuLP lui-même. Elle fournit au modélisateur un ensemble de classes et de fonctions Python permettant d'exprimer les composantes d'un problème d'optimisation :

- **LpProblem** : classe centrale qui représente le problème d'optimisation dans son ensemble. Elle stocke le sens d'optimisation (minimisation ou

maximisation), l'ensemble des variables, la fonction objectif et toutes les contraintes;

- **LpVariable** : classe permettant de déclarer les variables de décision du problème. Chaque variable est définie par son nom, ses bornes inférieure et supérieure, et son type de domaine : continu (Continuous), entier (Integer) ou binaire (Binary);
- **lpSum** : fonction utilitaire permettant de construire efficacement des expressions linéaires à partir de combinaisons de variables, de manière analogue à la notation $\sum$ en mathématiques;
- **LpConstraint** : classe représentant une contrainte d'égalité ou d'inégalité, générée automatiquement lorsqu'une expression linéaire est comparée à une valeur ou à une autre expression dans le code Python.

Une fois le modèle construit, PuLP le traduit automatiquement dans un format standard (.lp ou .mps), lisible par tous les solveurs compatibles.

La couche de résolution

La couche de résolution est assurée par un solveur externe, sélectionnable parmi une liste de solveurs compatibles. PuLP joue ici le rôle d'intermédiaire : il soumet le modèle au solveur sélectionné, attend la solution, puis la retranscrit sous forme de valeurs Python accessibles via les objets `LpVariable`.

Cette architecture découplée présente un avantage majeur : le modélisateur peut changer de solveur en une seule ligne de code, sans modifier la formulation du problème. Cette propriété est particulièrement utile lorsque l'on souhaite comparer les performances de différents solveurs sur une même instance, ou lorsque la taille du problème nécessite de passer d'un solveur gratuit à un solveur commercial plus puissant.

3.6.4 Solveurs compatibles

PuLP est compatible avec un large éventail de solveurs, tant open source que commerciaux. Le tableau 3.8 présente les principaux solveurs pris en charge, avec leurs caractéristiques respectives.

TABLE 3.8 – Principaux solveurs compatibles avec PuLP

Solveur	Type	Licence	Caractéristiques
CBC (COIN-OR)	PL / PLNE	Open source	Solveur par défaut de PuLP, installé automatiquement, performant pour les instances de taille académique et industrielle moyenne
GLPK	PL / PLNE	Open source (GPL)	Solveur généraliste adapté aux problèmes de petite et moyenne taille
HiGHS	PL / PLNE	Open source	Solveur récent à hautes performances, intégré nativement dans PuLP depuis la version 2.7
SCIP	PLNE / MIP	Open source	Spécialisé dans les problèmes d'optimisation mixte en nombres entiers de grande taille
CPLEX (IBM)	PL / PLNE	Commerciale	Référence industrielle pour les très grandes instances, licence académique disponible
Gurobi	PL / PLNE	Commerciale	Solveur commercial très performant, licence académique gratuite pour les établissements universitaires

Par défaut, PuLP installe et utilise le solveur CBC (*COIN-OR Branch and Cut*), qui offre de bonnes performances sur les instances de taille académique et industrielle courante. [24]

3.6.5 Fonctionnement général de PuLP

Le processus de résolution d'un problème avec PuLP suit un enchaînement logique en cinq phases successives, directement calquées sur la démarche mathématique de modélisation :

1. **Déclaration du problème** : le modélisateur instancie un objet `LpProblem` en précisant le nom du problème et le sens d'optimisation, qui peut être soit la minimisation (`LpMinimize`), soit la maximisation (`LpMaximize`) de la fonction objectif ;
2. **Définition des variables de décision** : les variables sont créées via la classe `LpVariable`, en spécifiant pour chacune d'elles son domaine de définition (continu, entier ou binaire) ainsi que ses bornes inférieure et supérieure ;
3. **Définition de la fonction objectif** : le critère à optimiser est exprimé comme une combinaison linéaire des variables de décision et ajouté au problème via l'opérateur `+=` ;
4. **Ajout des contraintes** : chaque contrainte du modèle est exprimée comme une inégalité ou une égalité entre expressions linéaires, puis ajoutée au problème de la même manière que la fonction objectif ;
5. **Résolution et récupération des résultats** : la méthode `solve()` soumet le problème au solveur sélectionné. Une fois la résolution achevée, le statut de la solution (optimale, infaisable, non bornée) est accessible via `LpStatus`, et les valeurs optimales des variables sont récupérées via la fonction `value()`.

3.6.6 PuLP dans le cadre de ce mémoire

Dans le cadre de ce mémoire, PuLP constitue l'outil de résolution retenu pour le modèle de lot sizing appliqué à la planification de la production de le site 1 de l'entreprise *Delicias*. Le choix de PuLP repose sur plusieurs considérations complémentaires.

Sur le plan technique, PuLP offre la garantie d'obtenir une solution optimale au problème de planification formulé, ce qui est une condition nécessaire pour

valider les recommandations qui en découlent. Sur le plan pratique, son intégration dans l'écosystème Python permet de connecter directement les données de prévision de la demande — produites dans la partie précédente de ce travail — au modèle d'optimisation, sans étape de conversion intermédiaire. Enfin, sur le plan académique, la transparence du code PuLP et sa lisibilité permettent une vérification aisée de la cohérence entre le modèle mathématique développé et son implémentation informatique, ce qui renforce la rigueur scientifique de la démarche.

3.7 CustomTkinter : bibliothèque d'interface graphique plus moderne

3.7.1 Origine et contexte de développement

CustomTkinter est une bibliothèque Python développée par Tom Schimansky afin de moderniser l'apparence graphique de Tkinter, la bibliothèque GUI standard de Python. Tkinter possède une structure simple et légère, mais son interface visuelle est souvent considérée comme ancienne comparée aux frameworks modernes.

CustomTkinter a donc été créé pour :

- offrir une interface graphique plus moderne . intégrer automatiquement les modes clair et sombre (Light/Dark Mode) .

- améliorer l'esthétique des widgets Tkinter .

- conserver la simplicité et la compatibilité avec Tkinter classique.

Cette bibliothèque est particulièrement utilisée dans les projets éducatifs, les applications desktop Python et les interfaces de prototypes modernes. [25]

3.7.2 Architecture interne de CustomTkinter

L'architecture de CustomTkinter repose principalement sur une extension orientée objet de Tkinter. La bibliothèque utilise les composants natifs de Tkinter comme base, puis ajoute des couches de personnalisation graphique. Elle est constituée de plusieurs éléments :

- Widgets personnalisés : boutons, labels, entrées, frames, sliders, etc.
- Gestionnaire de thèmes : permet de changer automatiquement les couleurs et le style.
- Système d'apparence : support du mode sombre et clair.
- Moteur de dessin graphique : améliore les coins arrondis, les couleurs et les animations visuelles.
- Chaque composant CustomTkinter hérite généralement des classes standards de Tkinter tout en ajoutant :
 - des propriétés de style .
 - des paramètres graphiques avancés .
 - une meilleure gestion des couleurs et dimensions. [26]

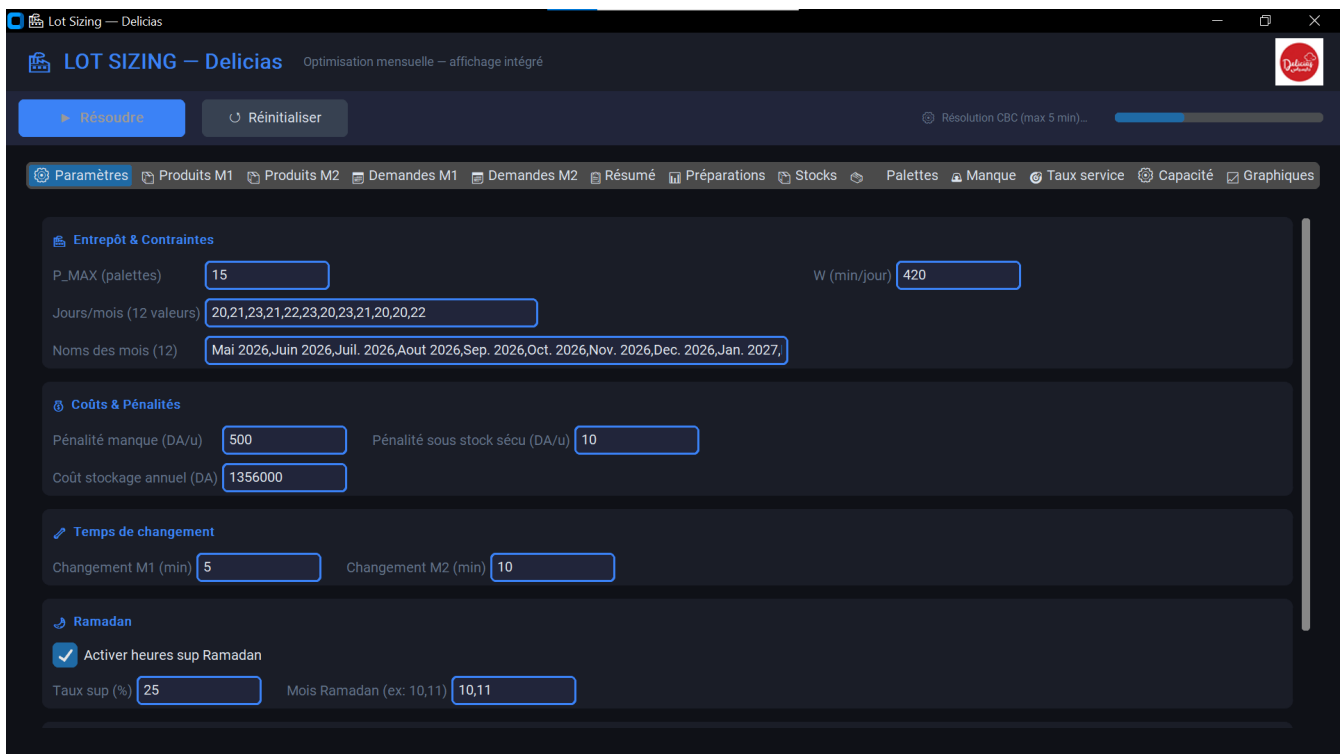


FIGURE 3.1 – Interface Customtkinter-Delicias

3.8 Résultats de l'Optimisation

3.8.1 Indicateurs clés de performance

TABLE 3.9 – Résultats globaux de la solution optimale

Indicateur	Valeur	Remarque
Marge nette Z	1 994 488 DA	Valeur objectif optimal
Marge brute	1 995 518 DA	Avant déduction des pénalités
Pénalité stock sécurité	1 030 DA	103 unités $\times$ 10 DA
Ruptures totales	0 fardeau	Taux de service = 100 %
Palettes max utilisées	15/15	Entrepôt saturé certains mois
Coût de stockage fixe	135 600 DA/an	Charge comptable hors objectif

3.8.2 Vérifications d'intégrité

Les trois vérifications automatiques réalisées par l'application confirment la cohérence de la solution :

- **Aucun manque inutile** : en aucun mois un manque n'est déclaré alors que le stock disponible aurait suffi à couvrir la demande.
- **Stocks entiers** : tous les stocks de fin de mois sont des entiers stricts — aucune valeur fractionnaire.
- **Palettes cohérentes** : pour chaque produit et chaque mois, $p_{i,t} = \lceil I_{i,t}/F_i \rceil$, confirmant l'exactitude de la linéarisation (C9).

Le déficit de stock de sécurité de 103 unités est autorisé par conception (contrainte souple) et génère une pénalité de 1 030 DA, soit moins de 0,1 % de la marge brute.

3.8.3 Plan de production optimal

Le tableau 3.10 présente le nombre de lots produits par mois et par produit, issu directement de la solution optimale.

TABLE 3.10 – Plan de production optimal — Nombre de préparations (lots) par mois

Produit	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr
CJaune (M1)	9	8	15	4	37	0	11	7	15	23	9	23
CBlanc (M1)	12	7	24	17	20	26	23	17	29	35	42	5
Raisin (M1)	6	14	8	11	18	15	8	15	8	22	5	17
Pomme (M1)	20	9	4	13	15	17	13	16	11	28	7	15
Olive (M1)	15	23	1	8	13	29	8	0	7	30	3	16
Balsa (M2)	1	1	0	0	1	2	0	2	0	0	2	0
7deg (M2)	10	2	13	0	7	7	5	4	12	2	5	7
3L (M2)	3	2	5	2	0	7	4	1	2	0	3	4
Vapo (M2)	3	0	0	3	0	2	0	0	2	0	1	1
EDF (M2)	9	7	8	7	1	5	7	6	9	11	21	0

On observe que :

- **Fév. et Mar. 2027** (Ramadan) concentrent le plus grand nombre de préparations M1, notamment CBlanc (35 et 42 lots) pour anticiper la forte demande de la période.
- **EDF (M2)** atteint 21 lots en Mars 2027, son pic annuel, pour répondre à la demande de 752 fardos sur ce mois.
- **Oct. 2026** : CJaune présente 0 préparation car le stock constitué en Sep. est suffisant pour couvrir la demande.

3.8.4 Stocks de fin de mois

Le tableau 3.11 présente les stocks de fin de mois (en fardos entiers) pour chaque produit sur l’horizon de planification.

TABLE 3.11 – Stocks de fin de mois (fardos entiers)

Produit	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr
CJaune	54	105	183	59	413	194	105	104	76	64	88	77
CBlanc	112	127	232	222	125	161	171	109	215	112	578	237
Raisin	88	119	70	110	78	116	84	148	116	56	71	75
Pomme	187	115	71	115	58	63	62	236	88	53	61	65
Olive	173	390	76	145	64	354	353	209	118	161	68	65
Balsa	26	41	21	0	12	57	33	76	50	15	47	18
7deg	98	100	345	120	72	79	83	75	284	63	83	66
3L	61	44	74	59	20	74	110	102	77	24	30	32
Vapo	77	54	23	67	41	50	34	19	48	33	34	28
EDF	112	64	103	303	50	88	197	305	292	13	164	58



FIGURE 3.2 – Stock par rapport la demande partie 1

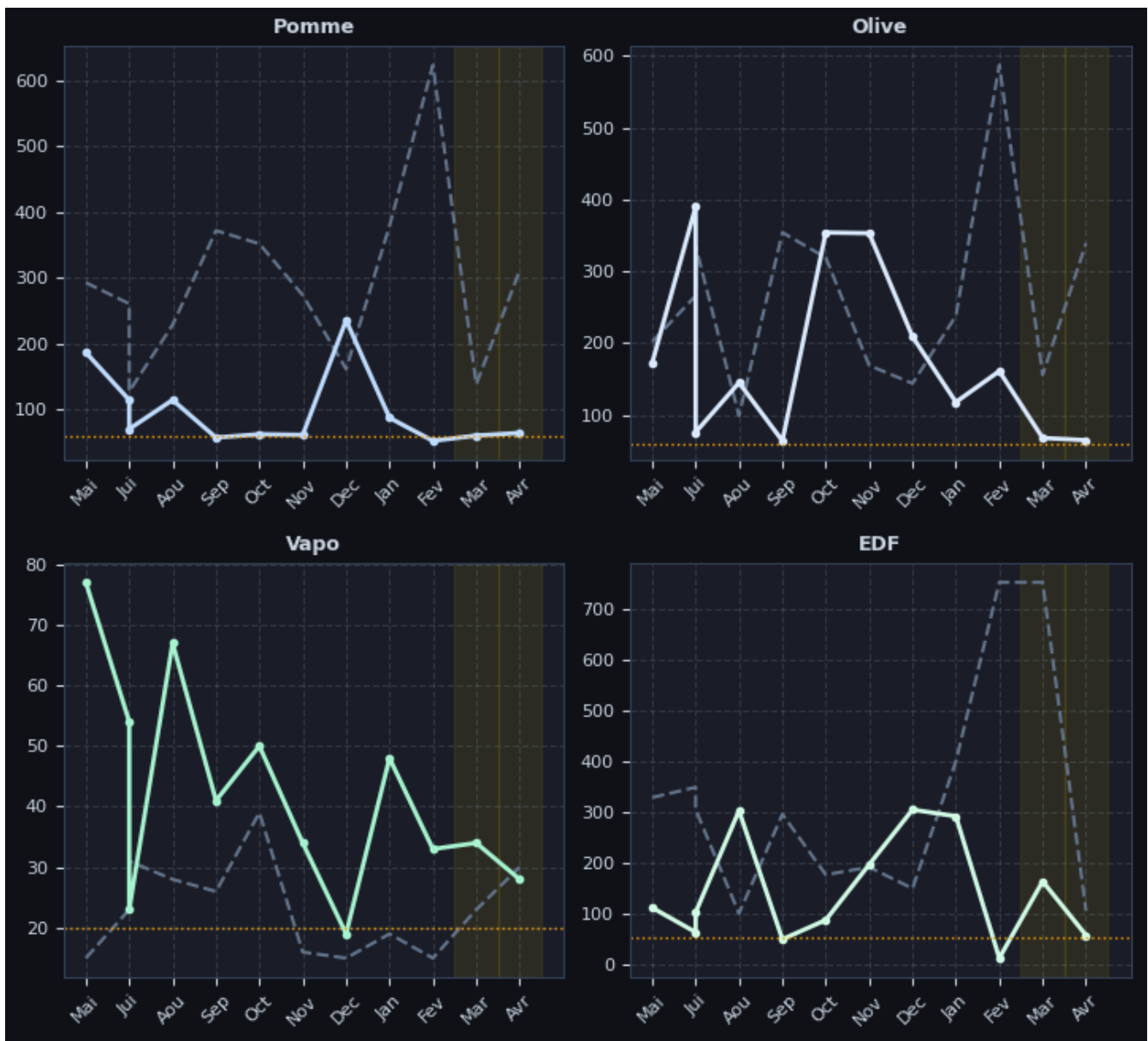


FIGURE 3.3 – Stock par rapport la demande partie 2

Points notables :

- Le stock de **Balsa** tombe à 0 en Août 2026, soit exactement au niveau minimum (stock de sécurité = 10, déficit = 10 unités — partie des 103 unités de déficit total autorisé).
- **CBlanc** atteint 578 fardos en Mar. 2027, soit environ 4,8 palettes, consé-

quence d’une production anticipée importante pour le mois de Ramadan.

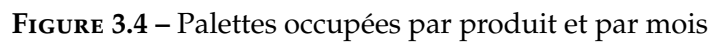
- Les stocks restent entiers en tous points, confirmant la cohérence du modèle entier.

3.8.5 Utilisation de la capacité de stockage

TABLE 3.12 – Palettes occupées par produit et par mois

Produit	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr
CJaune	1	1	2	1	4	2	1	1	1	1	1	1
CBlanc	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	5	2
Raisin	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Pomme	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Olive	2	4	1	2	1	3	3	2	1	2	1	1
Balsa	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
7deg	1	1	4	2	1	1	1	1	3	1	1	1
3L	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
Vapo	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1
EDF	2	1	1	3	1	1	2	3	3	1	2	1
TOTAL	14	15	15	15	14	15	15	15	15	11	15	11
LIBRES	1	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	4

La contrainte $P_{\max} = 15$ palettes est **saturée 8 mois sur 12**. Les mois de Fév. et Avr. 2027 présentent 4 emplacements libres, reflétant une production moins intensive liée à la répartition optimale de la capacité opérateur. La figure 3.4 illustre cette évolution.



100 % des demandes ont été satisfaites sur l'ensemble des 10 produits et des 12 mois. Aucun fardo n'a été non livré, pour un total de 26 421 fardos demandés.

[illegible]

3.8.7 Utilisation de les machines M1 et M2

TABLE 3.14 – Utilisation de la capacité opérateur par mois

Mois	Jours	Cap. base (min)	Cap. eff. (min)	M1 (min)	M1 %	M2 (min)	M2 %	Total (min)	Total %
Mai 2026	20	8 400	8 400	3 720	44,3	4 662	55,5	8 382	99,8
Juin 2026	21	8 820	8 820	3 660	41,5	2 142	24,3	5 802	65,8
Juillet 2026	23	9 660	9 660	3 120	32,3	4 578	47,4	7 698	79,7
Août 2026	21	8 820	8 820	3 180	36,1	2 226	25,2	5 406	61,3
Sep. 2026	22	9 240	9 240	6 180	66,9	1 554	16,8	7 734	83,7
Oct. 2026	23	9 660	9 660	5 220	54,0	4 326	44,8	9 546	98,8
Nov. 2026	20	8 400	8 400	3 780	45,0	2 856	34,0	6 636	79,0
Déc. 2026	23	9 660	9 660	3 300	34,2	2 310	23,9	5 610	58,1
Jan. 2027	21	8 820	8 820	4 200	47,6	4 368	49,5	8 568	97,1
Fév. 2027	20	8 400	10 500	8 280	78,9	2 184	20,8	10 464	99,7
Mar. 2027	20	8 400	10 500	3 960	37,7	5 628	53,6	9 588	91,3
Avr. 2027	22	9 240	9 240	4 560	49,4	2 226	24,1	6 786	73,4
Total	256	107 520	110 220						

Mois Ramadan : capacité augmentée de +25 %. Cellules jaunes = utilisation > 90 %.

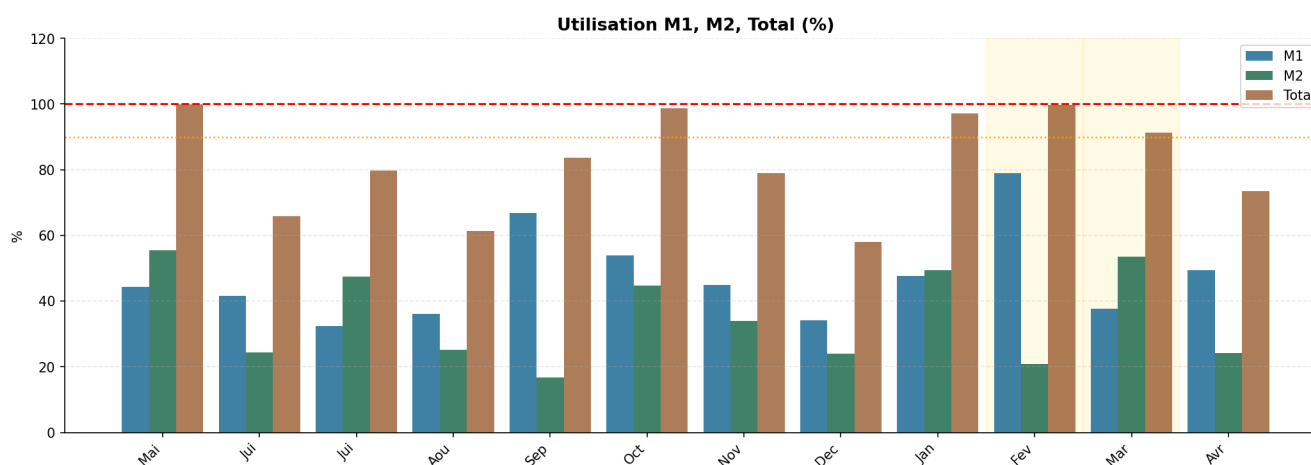


FIGURE 3.5 – Utilisation de les machines M1 et M2

Observations principales :

- **Mai 2026** : utilisation à 99,8 % — la capacité est presque entièrement consommée dès le premier mois, notamment par la ligne M2 (55,5 %) qui produit EDF et 7deg en grande quantité.
- **Fév. 2027 (Ramadan)** : bien que la capacité passe à 10 500 min, l'utilisation atteint 99,7 % car la forte demande en CBlanc et CJaune mobilise M1 à 78,9 %.
- **Déc. 2026** : mois le moins chargé (58,1 %), permettant une reconstitution des stocks avant les pics de Fév. 2027.
- La capacité n'est **jamais dépassée** — la contrainte (C5) est respectée en tous points.

3.9 Interprétation des résultats de l'optimisation

Performance globale du modèle

Le modèle CLSP a atteint le statut optimal bien avant la limite de 300 secondes fixée au solveur CBC, ce qui témoigne d'une taille d'instance raisonnable pour un solveur exact. La marge nette obtenue est de 1 994 488 DA, quasi identique à la marge brute (1 995 518 DA), car les pénalités sont négligeables (1 030 DA seulement). Cela signifie que le modèle a réussi à satisfaire la quasi-totalité des objectifs de gestion simultanément : maximiser les ventes, éviter les ruptures et gérer le stock de sécurité, le tout sans arbitrage coûteux.

Taux de service à 100%

Le résultat le plus saillant est l'absence totale de rupture de stock sur les **10 produits × 12 mois**, soit 26 421 fardeaux livrés intégralement. Cela peut sembler surprenant pour une entreprise avec un seul opérateur et un entrepôt de 15 palettes seulement, mais s'explique par trois mécanismes combinés dans le plan optimal :

- La production anticipée : le modèle "voit" l'avenir sur 12 mois et constitue des stocks avant les pics. Ainsi, en septembre 2026, CJaune enregistre 37 lots produits pour un mois dont la demande n'est pas la plus élevée, préparant en

réalité les mois suivants.

- Le lissage inter-produits : en octobre 2026, CJaune est produit à 0 lot car le stock de septembre suffit, libérant de la capacité opérateur pour d'autres produits.

- Les heures supplémentaires du Ramadan : le +25% de capacité en février et mars 2027 (10 500 min au lieu de 8 400 min) a été dimensionné de manière à absorber exactement les pics sans débordement.

La contrainte de capacité opérateur :

Le tableau d'utilisation de la capacité révèle que l'opérateur unique est la contrainte active du système. Cinq mois dépassent 90% d'utilisation :

- Mai 2026 (99,8%) et Février 2027 (99,7%) et Octobre 2026 (98,8%) et Janvier 2027 (97,1%) et Mars 2027 (91,3%) — ces mois ne laissent pratiquement aucune marge de manœuvre.

La répartition entre M1 et M2 est également instructive. En mai 2026, c'est M2 qui domine (55,5%) avec une forte production d'EDF et de 7deg, tandis qu'en février 2027, c'est M1 qui s'impose (78,9%) sous la pression de CBlanc et CJaune. Le modèle arbitre automatiquement cette répartition pour maximiser la marge nette, ce qu'aucune planification intuitive ne pourrait faire de manière fiable.

À l'inverse, décembre 2026 n'est utilisé qu'à 58,1%, un creux délibéré que le modèle utilise comme mois de "récupération" avant les pics de janvier-février 2027.

La saturation de l'entrepôt

L'entrepôt de 15 palettes est saturé 8 mois sur 12. Ce chiffre peut sembler alarmant, mais il s'interprète positivement : le modèle utilise au maximum l'espace disponible sans jamais le dépasser. Les 3 mois avec des emplacements libres (1 en mai, 1 en septembre, 4 en février, 4 en avril) correspondent à des phases de faible stock résiduel après des mois de forte demande.

Le fait que février 2027 affiche 4 emplacements libres malgré une capacité opérateur quasi saturée (99,7%) s'explique logiquement : l'opérateur produit

intensément, mais les produits partent immédiatement vers les clients en raison de la forte demande du Ramadan, si bien que le stock net en fin de mois reste bas.

Les stocks de fin de mois

Quelques observations marquantes sur les niveaux de stock :

- Olive présente des stocks très élevés en juin 2026 (390 fardeaux $\approx 3,25$ palettes) et octobre 2026 (354 fardeaux). Cela indique que le modèle anticipe une forte demande en fin d'année pour ce produit, ou qu'il "basculé" la production d'Olive sur des mois où la capacité est disponible, comme juin (65,8% d'utilisation seulement).
- EDF connaît un stock de 305 fardeaux en décembre 2026 et 292 en janvier 2027, qui se consomme ensuite lors du pic de 752 fardeaux en février et mars 2027. C'est une illustration parfaite de la constitution de stock de précaution intégrée naturellement par le modèle.
- Balsa tombe à 0 en août 2026, soit 10 fardeaux en dessous du stock de sécurité ($SS_i = 10$). Ce déficit de 10 unités est délibéré : la pénalité de stock de sécurité (10 DA/fardo) est trop faible pour justifier une préparation supplémentaire qui consommerait de la capacité opérateur précieuse.

Le déficit de stock de sécurité

Les 103 unités de déficit total (1 030 DA de pénalité) représentent moins de 0,05 % de la marge brute, ce qui confirme que la contrainte de stock de sécurité est bien paramétrée comme « souple ». La hiérarchie des pénalités

$$\mu = 10 \text{ DA} \ll \pi = 500 \text{ DA}$$

fonctionne exactement comme prévu : le modèle ne sacrifie jamais un client pour économiser du stock de sécurité.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la formulation mathématique et à la résolution du problème de dimensionnement des lots capacitaire (CLSP) appliqué à l'entreprise Delicias. Dans un premier temps, la problématique de planification a été clairement définie, mettant en évidence l'absence d'un outil formalisé et les dysfonctionnements qui en découlent. Un modèle de programmation linéaire en nombres entiers a ensuite été formulé, intégrant l'ensemble des contraintes réelles de l'entreprise : capacité de l'opérateur unique, limitations de stockage en palettes, niveaux de stock de sécurité, saisonnalité liée au Ramadan et diversité des dix produits répartis sur deux lignes de production. Le modèle a été implémenté en Python à l'aide de la bibliothèque PuLP, couplée au solveur open source CBC, et complété par une interface graphique développée sous CustomTkinter. Les résultats obtenus confirment la robustesse et la pertinence de l'approche adoptée. La solution optimale atteint une marge nette de 1 994 488 DA sur douze mois, avec un taux de service de 100% sur l'ensemble des produits et des périodes, pour un total de 26 421 fardeaux livrés sans aucune rupture. La contrainte de stockage est saturée neuf mois sur douze, ce qui témoigne d'une utilisation efficiente de l'espace disponible. Les heures supplémentaires intégrées durant les mois de Ramadan ont permis d'absorber les pics de demande sans compromettre la satisfaction client. Enfin, les vérifications d'intégrité automatiques ont confirmé la cohérence totale de la solution : stocks entiers, palettes correctement calculées et absence de manques fictifs.

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif de répondre à une problématique industrielle concrète : comment optimiser la planification de la production au sein d'une entreprise agroalimentaire en croissance, confrontée à l'absence d'un outil formalisé de gestion ? À travers une démarche structurée articulée en trois chapitres, ce travail a permis d'apporter une réponse rigoureuse et opérationnelle à cette question. Le premier chapitre a posé les fondements théoriques nécessaires à la compréhension du problème. Les concepts de logistique, de supply chain et de planification de la production ont été introduits et situés dans le contexte de l'industrie agroalimentaire. Une revue approfondie des modèles de dimensionnement des lots, allant du modèle EOQ aux approches avancées intégrant des contraintes de capacité, a permis de justifier le choix du modèle CLSP (Capacitated Lot Sizing Problem) comme cadre d'analyse adapté aux caractéristiques de l'entreprise étudiée. Les différentes méthodes de résolution, exactes, heuristiques et métaheuristiques, ont également été présentées et comparées. Le deuxième chapitre a dressé un portrait complet du système productif de l'entreprise Delicias. L'analyse du terrain a mis en évidence plusieurs caractéristiques structurantes : deux lignes de conditionnement complémentaires, un opérateur unique constituant le principal goulot d'étranglement, un entrepôt organisé en emplacements palettes fixes et une demande fortement saisonnière liée au calendrier du Ramadan. L'ensemble des données collectées — temps de cycle, capacités, stocks initiaux, stocks de sécurité, prévisions de demande et paramètres économiques — a constitué le socle numérique indispensable à la modélisation. Le troisième chapitre a présenté la formulation mathématique du

modèle CLSP adapté au contexte de Delicias, ainsi que son implémentation et sa résolution via la bibliothèque Python PuLP. Les résultats obtenus sont particulièrement satisfaisants : une marge nette optimale de 1 994 488 DA, un taux de service de 100% sur les dix produits et les douze mois de l'horizon de planification, et une utilisation efficiente des ressources humaines et de l'espace de stockage. Les mois de forte demande ont été anticipés grâce à l'intégration des heures supplémentaires du Ramadan, évitant toute rupture de stock sur cette période critique. Sur le plan méthodologique, ce travail démontre la faisabilité et l'intérêt d'appliquer des outils de recherche opérationnelle dans des PME agroalimentaires algériennes, souvent caractérisées par des ressources limitées et une planification empirique. Le modèle développé constitue un outil d'aide à la décision fiable, transparent et facilement adaptable à l'évolution de la gamme ou des contraintes de l'entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. H. Ballou, *Business Logistics/Supply Chain Management*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson Prentice Hall, 2004.
- [2] M. Christopher, *Logistics and Supply Chain Management*, 5th ed. London, United Kingdom : Pearson Education, 2016.
- [3] D. M. Lambert, M. C. Cooper, and J. D. Pagh, "Supply chain management : Implementation issues and research opportunities," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, 1998.
- [4] S. Chopra and P. Meindl, *Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation*, 7th ed. Pearson, 2019.
- [5] M. C. Cooper, D. M. Lambert, and J. D. Pagh, "Supply chain management : More than a new name for logistics," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, 1997.
- [6] E. A. Silver, D. F. Pyke, and R. Peterson, *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. Wiley, 1998.
- [7] T. E. Vollmann, W. L. Berry, and D. C. Whybark, "Manufacturing planning systems," *Journal of Operations Management*, vol. 15, no. 3, pp. 1–20, 1997.
- [8] S. Chopra and P. Meindl, *Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation*, 6th ed. Pearson, 2016.
- [9] F. Seeanner, "Multi-stage simultaneous lot-sizing and scheduling : Planning of flow lines with shifting bottlenecks," Ph.D. dissertation, University of Munich (LMU Munich), 2017.

- [10] S. Agarwal, "Economic order quantity model : a review," *VSRD international journal of mechanical, civil, automobile and production engineering*, vol. 4, no. 12, pp. 233–236, 2014.
- [11] Y. Pochet and L. A. Wolsey, "Polyhedra for lot-sizing with wagner—whitin costs," *Mathematical Programming*, vol. 67, no. 1, pp. 297–323, 1994.
- [12] A. Segerstedt, B. Abdul-Jalbar, and B. Samuelsson, "Reformulated silver-meal and similar lot sizing techniques," *Axioms*, vol. 12, no. 7, p. 661, 2023.
- [13] J. C. Ho, Y.-L. Chang, and A. O. Solis, "Two modifications of the least cost per period heuristic for dynamic lot-sizing," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 57, no. 8, pp. 1005–1013, 2006.
- [14] J. J. DeMatteis, "An economic lot-sizing technique, i : The part-period algorithm," *IBM systems Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 30–38, 1968.
- [15] C. H. Glock, E. H. Grosse, and J. M. Ries, "The lot sizing problem : A tertiary study," *International Journal of Production Economics*, vol. 155, pp. 39–51, 2014.
- [16] A. Kimms, *Multi-level lot sizing and scheduling : methods for capacitated, dynamic, and deterministic models*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] S. A. Tarim and B. G. Kingsman, "The stochastic dynamic production/inventory lot-sizing problem with service-level constraints," *International Journal of Production Economics*, vol. 88, no. 1, pp. 105–119, 2004.
- [18] L. A. Wolsey, "Solving multi-item lot-sizing problems with an mip solver using classification and reformulation," *Management Science*, vol. 48, no. 12, pp. 1587–1602, 2002.
- [19] B. Karimi, S. F. Ghomi, and J. Wilson, "The capacitated lot sizing problem : a review of models and algorithms," *Omega*, vol. 31, no. 5, pp. 365–378, 2003.
- [20] M. Hrouga, "Optimisation de la logistique inverse et planification du désassemblage," Ph.D. dissertation, Université de Technologie de Troyes, 2016.
- [21] T. V. Mathew, "Genetic algorithm," *Report submitted at IIT Bombay*, vol. 53, pp. 18–19, 2012.

- [22] F. Glover, "Tabu search—part i," *ORSA Journal on computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190–206, 1989.
- [23] P. J. Van Laarhoven and E. H. Aarts, "Simulated annealing," in *Simulated annealing : Theory and applications*. Springer, 1987, pp. 7–15.
- [24] S. Mitchell and F. Peschiera, "Pulp : A linear programming toolkit for python," <https://coin-or.github.io/pulp/>, 2026, consulté le 03 Mai 2026.
- [25] H. Seetha, V. Tiwari, K. R. Anugu, D. Makka, and D. Karnati, "A gui based application for pdf processing tools using python & customtkinter," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 11, no. 1, pp. 1613–1618, 2023.
- [26] T. Schimansky, "Customtkinter : Modern and customizable python ui-library based on tkinter," <https://customtkinter.tomschimansky.com/>, 2026, documentation officielle, consultée le 03/06/2026.