1.5em

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département Génie Logistique et Transport

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

D'INGENIEUR d'État

Filière

Ingénierie de Transport

Spécialité

Ingénierie de la chaine logistique

Thème

Développement d'un ERP modulaire conçu pour l'optimisation de la chaîne logistique (Startup)

El kendi filiale de l'entreprise Ms pharma

Réalisé par

BENALI Walid, BENBETKA Mohamed ELAmine, KOUADRI BOUDJELTHIA Abdelakadir, OUADI Souhaib

Les membres de Jury :

MOULAI Ratiba	Présidente	MAA
BADJARA Mohamed ELAmine	Promoteur	MAA
BOUZID M.Cherif	Examinateur	MCA
AMICHI Houcine	Examinateur	MAA
BENAISSA Mohamed lazhar	Examinateur	MCB
REZKI Nafissa	Examinatrice	MCB
ANNAD Oussama	Co-Promoteur	MCB
SELLIDJ Wassila	Co-Promotrice	MCB

Alger, le 23 / 06 /2024

Année universitaire 2023-2024

Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu le bon Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour arriver à ce stade et achever ce travail.

Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements tout particulièrement à notre encadrant Mr Badjara Mohamed El Amine, pour sa disponibilité et ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion, ses conseils avisés, ses orientations et le temps qu'il nous a accordé pour notre encadrement.

Nos remerciements vont aussi à l'endroit de toute l'équipe supply chain de l'entreprise El Kendi pour la qualité de la formation dispensée et de la patience dont ils ont fait preuve durant toute la période de notre stage ; plus particulièrement : Mr Sid Ali Magnouche pour son encadrement durant cette période de stage, et surtout pour ses orientations, conseils et efforts considérables qu'il nous a apportés.

Nous remercions profondément tous les enseignants de l'ENSTA qui nous ont encouragés, aidés et soutenus pour la réalisation de ce travail. Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire : Mr Annad Oussama pour nous avoir accordé des entretiens et son soutien et encouragement, M Sellidj qui nous a beaucoup appris sur la supply chain tout au long de notre cursus, et Mr Boughaleb Sadek El Amine pour nous avoir accompagnés sur la démarche Start-up.

Nos profonds remerciements aux membres de notre jury pour le grand honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail.

Enfin, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce projet de fin d'études.

Table des matières

Introduction **6**

1 Contextualisation **8**
1.1 Introduction . . . 9
1.2 Présentation du groupe MS Pharma . . . 10
1.3 Présentation de l'entreprise EL KENDI . . . 10
1.3.1 Activités . . . 11
1.3.2 Les formes usuelles produites par El Kendi . . . 12
1.4 L'analyse des processus métiers de l'entreprise . . . 12
1.4.1 Etat des lieux . . . 12
1.4.1.1 Organisation des espaces de stockage . . . 12
1.4.1.2 Répartition des produits par étage . . . 13
1.4.1.3 Organisation par zone . . . 13
1.4.2 Produit psychotrope . . . 13
1.5 Les flux physiques dans les magasins . . . 14
1.5.1 Réception . . . 14
1.5.2 Mise en quarantaine . . . 15
1.5.3 Changement de statut . . . 15
1.5.4 Pesée & transfert . . . 15
1.6 Achat et approvisionnement . . . 16
1.6.1 Approvisionnement . . . 16
1.6.2 Identification des besoins . . . 16
1.6.3 Sélection des fournisseurs . . . 16
1.6.4 Sélection . . . 17
1.6.5 Commande et approvisionnement . . . 17
1.6.6 Paiement et clôture . . . 17
1.7 Production et planification . . . 17
1.7.1 Planification . . . 18
1.7.2 Assurance Qualité . . . 19
1.7.3 Processus de fabrication des médicaments : . . . 19
1.7.4 Conditionnement . . . 20
1.8 Généralités sur la gestion de projet . . . 20
1.8.1 Définition d'un projet . . . 20
1.8.2 Caractéristiques d'un projet . . . 21
1.8.3 Gestion de projet . . . 21
1.8.4 Cycles de vie du projet . . . 22
1.8.4.1 Phase de projet . . . 22
1.8.4.2 Porte de phase . . . 22

1.8.4.3 Les phases d'un projet 22
1.8.5 Caractéristiques d'un projet système d'information 23
1.8.6 Difficultés des projets ERP et modélisation d'entreprise 24
1.9 Motivations du projet 25
1.10 Problématique 25
1.11 Conclusion 26

2 Les ERP **27**
2.1 Intoduction 28
2.2 Les Systèmes d'informations 28
2.2.1 Définition d'une information : 28
2.2.2 Définition d'un system d'information : 29
2.2.3 Les fonctions du système d'information 29
2.2.4 Types des systèmes d'information 30
2.2.5 La graduation des besoins informatiques et leurs réponses 30
2.2.6 Les niveaux de réponse des produits informatiques aux besoins des entreprises : 31
2.3 Définition d'un ERP 31
2.4 Origines et évolution des progiciels intégrés 33
2.5 Types d'ERP 34
2.6 Cycle de vie d'un projet ERP 36
2.7 Intégration des ERP 37
2.7.1 Modes d'intégration des ERP 38
2.7.2 Composants intégrés par les ERP : 38
2.8 Les modules ERP 38
2.8.1 Achat 40
2.8.2 Production 40
2.8.3 WMS 40
2.8.4 Transport 41
2.9 Impacts des ERP sur l'économie, l'organisation et sur la chaine logistique 42
2.9.1 Sur l'économie 42
2.9.2 Sur l'organisation 42
2.9.3 Sur la chaine logistique 42
2.10 Conclusion 44

3 Outils Et Concepts **45**
3.1 Introduction 46
3.2 Partie 01 : Théorie des graphes 46
3.2.1 Définitions de Base sur la théorie des graphes : 46
3.2.2 Types de Graphes 48
3.2.3 Algorithme kruskal 48
3.2.3.1 les étapes : 48
3.2.3.2 Résultat : 49
3.3 Partie 02 : Programmation Mathématique 49
3.3.1 L'optimisation mathématique : 49
3.3.2 L'optimisation Combinatoire 49
3.3.3 Complexité des Algorithmes : 50
3.3.4 Complexité des Problèmes 51
3.3.4.1 Classe P 51

3.3.4.2 Classe NP . . . 51
3.3.4.3 Problèmes NP-complets : . . . 51
3.3.4.4 Problèmes d'optimisation NP-difficiles . . . 51
3.3.5 Méthodes de résolution . . . 52
3.3.5.1 Méthodes exactes . . . 52
3.3.5.2 Méthodes approchées . . . 53
3.3.6 Problème d'affectation : . . . 57
3.3.6.1 Algorithme Hongrois : . . . 58
3.3.6.2 Description de l'Algorithme . . . 58
3.3.7 Problème VRP : . . . 58
3.3.8 Les variantes du VRP traitées par l'API VROOM . . . 59
3.3.9 Algorithme génétique . . . 62
3.3.9.1 Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique . . . 63
3.3.9.2 Caractéristiques des Algorithmes Génétiques . . . 64
3.3.9.3 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) . . . 64
3.3.9.4 Fonctionnement de NSGA-II . . . 65
3.3.9.5 Classement Non-dominé et Distance de Crowding . . . 65
3.4 Partie 03 : Optimisation multi-objectif . . . 66
3.4.1 L'analyse multicritères d'aide à la décision . . . 68
3.4.2 Composants Des Problèmes MCDA . . . 69
3.4.3 Processus d'Aide à La Décision Multicritère . . . 70
3.4.4 Méthodes d'Agrégation : . . . 70
3.4.5 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) . . . 71
3.4.5.1 Les étapes de l'AHP : . . . 72
3.4.5.2 Avantages de la méthode AHP [21] : . . . 76
3.4.5.3 Limites de la méthode AHP : . . . 76
3.5 Conclusion . . . 77

4 Partie pratique **78**
4.1 Introduction . . . 79
4.2 Conception : . . . 80
4.2.1 Langage UML : . . . 80
4.2.2 Identification des acteurs : . . . 80
4.2.3 Module Achat & approvisionnement : . . . 82
4.2.4 TMS : . . . 83
4.2.5 WMS : . . . 84
4.2.6 Production : . . . 85
4.2.7 Diagramme Entité - Relation (ERD) . . . 86
4.3 Réalisation : . . . 87
4.3.1 Environnement de développement (technologies et Frameworks) ; . . . 87
4.3.1.1 PostgreSQL : . . . 87
4.3.1.2 Java : . . . 87
4.3.1.3 JavaFX, Scene Builder, CSS . . . 88
4.3.1.4 II.1.3.1. Utilisation de JavaFX et Scene Builder : . . . 89
4.3.1.5 Stylisation avec CSS pour JavaFX . . . 89
4.3.1.6 VROOM - Vehicle Routing Open-source Optimization Machine . . . 89
4.3.1.7 OpenStreetMap (OSM) . . . 90

4.3.1.8 JMetal 90
4.3.2 Architecture : 91
4.3.2.1 Couche de Présentation : 91
4.3.2.2 Couche de Logique Métier : 93
4.3.2.3 Couche d'Accès aux Données : 96
4.3.2.4 Couche de Données : 96
4.3.3 Analyse Fonctionnel des modules : 96
4.3.4 Optimisation 102
4.3.4.1 Achat : 102
4.3.4.2 Production : 106
4.3.4.3 WMS : 111
4.3.4.4 TMS 115
4.4 Implémentation 122
4.5 Conclusion 126

Conclusion Générale **127**

Annexe A Figures et tableau **132**

Table des figures

1.1 Laboratoire EL-Kendi . . . 11
1.2 Façade latérale de l'usine El KENDI [47] . . . 13
1.3 Flux physiques dans le magasin . . . 14
1.4 Phases du projet . . . 23

2.1 Types d'ERP [37] . . . 35
2.2 Le Cycle ERP [15] . . . 36
2.3 Modules d'ERP Source : nextgestion.com . . . 39

3.1 Classification des méthodes d'optimisation [20] . . . 52
3.2 Phases du projet . . . 59
3.3 Fonctionnement d'un algorithme génétique [10] . . . 64
3.4 Fonctionnement de NSGA -II [23] . . . 65
3.5 problème d'optimisation multi-objectifs [2] . . . 67
3.6 L'ensemble Pareto et son image dans l'espace objectif[2] . . . 68
3.7 Processus d'Aide à La Décision [2] . . . 70
3.8 La décomposition d'un probème dans le cas d'un seul décideur [21] . . . 73
3.9 La décomposition d'un probème dans le cas de plusieurs décideurs [21] . . . 73

4.1 Diagrame USE-Case du Module Achat . . . 82
4.2 Diagrame USE-Case du Module TMS . . . 83
4.3 Diagrame USE-Case du Module WMS . . . 84
4.4 Diagrame USE-Case du Module Production . . . 85
4.5 Diagrame ERD . . . 86
4.6 Logo de PstgreSQL . . . 87
4.7 Logo Java . . . 88
4.8 Architecture en Couche du logiciel . . . 91
4.9 Fenêtre SceneBuilder . . . 92
4.10 Fichier fxml . . . 92
4.11 Fichier Css . . . 93
4.12 Module Achat . . . 94
4.13 Module Production . . . 94
4.14 Module WMS . . . 95
4.15 Module TMS . . . 95

A 1 Organigramme de l'entreprise . . . 133
A 2 Plan AC 1 . . . 134
A 3 Plan AC 2 . . . 135
A 4 Plan Magasin 1 . . . 136

A 5 Plan Magasin 2 137
A 6 Plan magasin produit fini importé 138
A 7 fiche de reception 1 139
A 8 fiche de reception 2 140
A 9 fiche de reception 3 141

Liste des tableaux

2.1 Comparaison entre ERP sur site et ERP cloud [30] [37] 34

3.1 Matrice de décision 70
3.2 Comparaison des méthodes d'agrégation 71
3.3 L'échelle numérique de Saaty 74
3.4 Matrice B des jugements relatifs du niveau (1) 74
3.5 Matrice D des jugements relatifs du niveau (2) 75
3.6 Tableau des valeurs de l'Indice d'Incohérence (IA) en fonction du nombre de critères 76

4.1 Modules, Acteurs et Cas d'utilisation 81
4.2 Analyse fonctionnel du module Achat 97
4.3 Analyse fonctionnel du module Production 99
4.4 Analyse fonctionnel du module WMS 100
4.5 Analyse fonctionnel du module TMS 101

Liste des abréviations

AC Article de Conditionnement
ACID Atomicité, Cohérence, Isolation, Durabilité
AFITEP Association francophone de management de projet
AFNOR Association Française de Normalisation
AG Algorithmes Génétiques
AHP Analyse Hiérarchique des Procédés
BMR Batch Manufacturing Record
BoM Bill of Materials
BPR Batch Packaging Records
CAO Conception Assistée par Ordinateur
CFAO Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
CLL Certificat de Libération de Lot
CRM Customer Relationship Management
CVRP VRP Capacité
CVRPTW Capacitated VRP with Time Windows
DCI Dénomination Commune Internationale
ERP Enterprise Resource Planning
FDA Food and Drug Administration
GA Gestion Administrative
GCCF Gestion Commerciale, Comptable et Financière
GP Gestion de Production
IA Intelligence Artificielle / Indice de Cohérence Aléatoire
IC Indice de Cohérence
ICH Chambre Internationale de l'Harmonisation
IoT Internet of Things
IUG Interface Utilisateur Graphique
JDBC Java Database Connectivity
JVM Machine Virtuelle Java
MA Medical Assistant
MCDA Analyse Multicritères d'Aide à la Décision
MDHVRPTW Multi-depot Heterogeneous VRPTW

MDVRP Multiple Dépôts VRP
MP Matière Première
MRP Manufacturing Resource Planning
NSGA-II Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
OC Ordre de Conditionnement
OF Ordre de Fabrication
ORM Object-Relational Mapping
OSD Oral Solid Dosage
OSM OpenStreetMap
OVRP VRP Ouvertes
PDPTW Pickup and Delivery Problem with Time Windows
PIC Plan Industriel et Commercial
PLNE Programme Linéaire en Nombre Entier
RC Rapport de Cohérence
RD Recherche et Développement
RFID Radio Frequency Identification
RH Ressources Humaines
RO Recherche Opérationnelle
SaaS Software as a Service
SCM Supply Chain Management
SDVRP Site Dependent VRP
SGBDR Système de Gestion de Base de Données Relationnelle
SI Système d'Information
TSP Problème du Voyageur de Commerce
UML Langage de Modélisation Unifié
VRP Problème de Tournées de Véhicules
VRPTW VRP Time Window
WMS Warehouse Management System

Introduction génerale

Dans la dernière décennie, l'avancement technologique, en particulier dans le domaine des technologies de l'information (IT), a connu une croissance exponentielle. Cet essor rapide a profondément transformé divers secteurs, y compris la gestion de la chaîne logistique. L'intégration des IT a permis une optimisation accrue des processus, une amélioration de la visibilité et de la traçabilité des opérations, ainsi qu'une meilleure réactivité face aux fluctuations du marché. Ces avancées ont conduit à une transformation radicale des pratiques de gestion des chaînes d'approvisionnement, rendant les systèmes plus agiles, efficaces et capables de répondre aux besoins croissants des consommateurs.

L'impact des technologies de l'information sur la gestion de la chaîne logistique est indéniable. L'implémentation de systèmes d'information avancés, tels que les logiciels de gestion intégrés (ERP), a permis aux entreprises de centraliser leurs données, d'améliorer la communication inter-départementale et d'optimiser l'ensemble des processus logistiques. Les ERP offrent une vue d'ensemble en temps réel des opérations, ce qui facilite la prise de décisions informées et stratégiques. De plus, ces systèmes permettent une meilleure gestion des stocks, une planification plus précise de la production, et une coordination efficace avec les fournisseurs et les distributeurs. Ainsi, les entreprises peuvent non seulement réduire leurs coûts opérationnels mais aussi améliorer leur niveau de service client. C'est dans ce contexte de transformation digitale que s'inscrit notre travail. Le présent mémoire détaille la modélisation et la mise en place d'un nouveau système ERP modulaire spécialisé dans la gestion de la chaîne logistique. Notre projet vise à développer un ERP adapté aux besoins spécifiques des entreprises opérant dans le domaine de la logistique, avec une focalisation sur l'optimisation des processus internes et l'amélioration de la performance globale.

Le système proposé est conçu pour être modulaire, permettant ainsi une flexibilité et une adaptabilité maximales aux différentes configurations et besoins des entreprises. Il intègre des fonctionnalités clés pour la gestion des achats, la planification de la production, la gestion des entrepôts et le suivi des transports.

Les principaux objectifs de ce mémoire sont d'analyser les besoins spécifiques des entreprises logistiques en matière de gestion des opérations, de développer une architecture ERP modulaire capable de répondre à ces besoins de manière efficace et flexible, et d'implémenter et tester le système ERP dans un environnement réel pour évaluer ses performances et identifier les axes d'amélioration.

Ces objectifs visent à assurer une compréhension approfondie des exigences métiers, à concevoir un système performant et adaptable, et à fournir des recommandations pratiques basées sur des tests empiriques pour optimiser la gestion de la chaîne logistique.

Pour ce faire, le travail a été subdivisé en 4 chapitres :

- **Chapitre 1 :** Définir le contexte de l'entreprise d'EL KENDI et identifier les défis majeurs dans la gestion de la chaîne logistique et la production, justifiant ainsi la nécessité d'un ERP.
- **Chapitre 2 :** Explorer les systèmes ERP, leurs fonctionnalités, avantages et inconvénients, ainsi que les implications organisationnelles de leur déploiement
- **Chapitre 3 :** Présenter les méthodologies de conception du système ERP, en détaillant les choix techniques et les modules spécifiques à intégrer pour répondre aux besoins identifiés.
- **Chapitre 4 :** Décrire l'implémentation pratique du système ERP, y compris les tests effectués pour valider son efficacité et ses performances dans un environnement réel.

Chapitre 1

Contextualisation

1.1 Introduction

L'industrie pharmaceutique constitue un secteur d'activité dont la vocation principale réside dans la recherche, le développement, la fabrication et la commercialisation de produits médicamenteux, qu'ils soient à visée préventive ou curative. De manière générale, cette activité concerne prioritairement les médicaments destinés à l'usage humain, bien que certaines publications fassent également référence aux domaines vétérinaires. Ce pan industriel se caractérise par une fragmentation marquée, aucun acteur pharmaceutique ne détenant plus de 10% des parts du chiffre d'affaires mondial, et ce malgré les nombreuses opérations de fusions-acquisitions régulièrement relayées par la presse financière.[34]

Par ailleurs, l'industrie pharmaceutique affiche une culture de mondialisation relativement ancienne, inhérente à la réglementation encadrant les autorisations de mise sur le marché des médicaments. Les premières réglementations européennes établissant des formats standardisés de requis datent de plus d'une décennie. Depuis plusieurs années, des conférences visant l'harmonisation mondiale de ces procédures sont organisées (réunions ICH). De fait, les entreprises de ce secteur revêtent souvent un caractère international, tendance renforcée par les vagues de fusions-acquisitions. Ainsi, le développement d'un nouveau médicament s'opère fréquemment de manière simultanée sur plusieurs territoires, parfois par diverses compagnies concomitamment, nécessitant des techniques de gestion multi-sites et multiculturelles dès le stade initial.

L'industrie pharmaceutique se présente comme un secteur fortement contraint par un cadre réglementaire strict, censé garantir la sécurité des médicaments, ces produits singuliers, qui bénéficient en retour d'un marché protégé. L'encadrement étatique de la production pharmaceutique revêt une dimension historique prononcée, intrinsèquement liée à la fonction régalienne de préservation de la santé publique. Néanmoins, les acteurs industriels tendent à rester discrets sur les instruments régissant cet encadrement, tels que les systèmes de maîtrise des procédés et de contrôle qualité. Il apparaît que ces derniers ont été largement élaborés par les industriels eux-mêmes, tant pour apporter des gages de sécurité sanitaire que pour restreindre l'accès au marché des médicaments aux nouveaux entrants, accentuant ainsi la rentabilité du secteur.

Cette situation soulève des interrogations quant à l'équilibre entre impératifs de santé publique et enjeux économiques au sein de l'encadrement réglementaire de l'industrie pharmaceutique. Les contraintes normatives, bien qu'essentielles pour garantir l'innocuité des produits médicamenteux, semblent également servir les intérêts commerciaux des acteurs établis en érigeant des barrières à l'entrée sur un marché hautement lucratif.[33]

L'industrie pharmaceutique revêt une importance cruciale au sein du paysage industriel algérien, assumant une fonction primordiale dans l'approvisionnement en médicaments indispensables pour la population. Sur le long terme, l'Algérie a déployé des efforts soutenus visant à renforcer ce secteur stratégique, se traduisant par une réduction progressive de sa dépendance vis-à-vis des importations pharmaceutiques. À l'heure actuelle, le pays dispose d'une industrie pharmaceutique en pleine expansion, dotée d'une capacité de production locale couvrant un large éventail de médicaments génériques.

Cette dynamique témoigne des avancées réalisées par l'Algérie dans le but d'atteindre

une plus grande autonomie dans la fourniture de produits médicamenteux essentiels à sa population.

Ce secteur d'activité en constante évolution, confronté à de nombreux défis [12] :

- **Complexité croissante des médicaments** Les médicaments d'aujourd'hui sont de plus en plus complexes, souvent biologiques ou à base de molécules innovantes.
- **Réglementations strictes :** L'industrie pharmaceutique est soumise à des réglementations strictes en matière de sécurité, de qualité et d'efficacité des médicaments.
- **Pression sur les coûts :** La pression sur les coûts est croissante, avec des budgets de santé de plus en plus serrés.
- **Concurrence accrue :** La concurrence est intensifiée, tant au niveau national qu'international.
- **Besoin d'innovation :** L'industrie pharmaceutique doit constamment innover pour développer de nouveaux médicaments et répondre aux besoins médicaux non satisfaits.

1.2 Présentation du groupe MS Pharma

MS Pharma est une société pharmaceutique multinationale spécialisée dans le développement, la production et la distribution de médicaments génériques et de spécialité. Avec l'introduction d'une nouvelle équipe de direction dirigée par Kalle Känd, PDG, un bureau de gestion d'entreprise a été créé à Zug, en Suisse. La société reste basée à Amman, en Jordanie. Fondée en 1989, MS Pharma compte plus de 2400 employés répartis dans la région MENA.

- Capacités de vente B2C au Moyen-Orient, Afrique du Nord et sub-saharienne.
- 3 centres de R&D
- 5 installations de fabrication

Large base technologique couvrant OSD, liquides, crèmes, onguents et stériles (injectables) dans tous les domaines thérapeutiques clés [62].

- 300 DCI
- 2000+ MA enregistrées
- Plus de 90 autres produits (DCI) en cours de développement et d'enregistrements

1.3 Présentation de l'entreprise EL KENDI

EL KENDI est une entreprise pharmaceutique algérienne (fondée en 2009) avec investissement direct étranger, de production de médicaments ambitieuse et en pleine expansion, employant une équipe compétente et dédiée qui dépasse 1000 personnes et les 200 produits. EL KENDI, MS Pharma est la première entreprise du médicament générique en Algérie, avec plus de 75 DCI sur le marché.

El Kendi a consenti au plus grand investissement industriel privé en Algérie dans le domaine de la pharmacie, il s'agit de l'usine située au niveau de la zone industrielle de Sidi Abdellah (Zéralda) d'un montant global de 150 millions de dollars. La fabrication des

produits d'EL KENDI est effectuée selon les normes internationales, dans une installation dont les plans sont approuvés par la FDA (Food and Drug Administration). Toutes les formes usuelles sont fabriquées à savoir les formes sèches (comprimés, gélules), liquides et semi liquide (crèmes, gels). L'entreprise a intégré le groupe pharmaceutique régional MS Pharma en 2013 qui est une plateforme lui permettant un accès rapide aux marchés voisins comme le Maroc, la Tunisie et les pays Africains francophones.[14]

FIGURE 1.1 – Laboratoire EL-Kendi

La hiérarchie de l'entreprise se présente dans l'annexe : A 1

1.3.1 Activités

Les activités de l'entreprise sont [59] :

- Produits pharmaceutiques pour le système cérébral et nerveux et l'anesthésie
- Produits pharmaceutiques pour le système cardio-vasculaire
- Produits pharmaceutiques pour l'oto-rhino-laryngologie, la stomatologie et la dentisterie
- Produits pharmaceutiques pour l'ophtalmologie
- Produits pharmaceutiques pour le métabolisme et la nutrition
- Produits pharmaceutiques pour la dermatologie
- Produits pharmaceutiques pour l'urologie, la gynécologie et l'obstétrique
- Produits pharmaceutiques pour la pneumologie
- Produits pharmaceutiques pour la gastro-entérologie et l'hépatologie
- Produits pharmaceutiques génériques
- Produits médicinaux asiatiques et orientaux

1.3.2 Les formes usuelles produites par El Kendi

Les forme usuelles produites par le laboratoire se divise en trois catégories [7] :
Formes sèches :

- Comprimés.
- Gélules.
- Sachets.

Liquides :

- Sirop.
- Injectables.
- Suspension.

Semi-solides :

- Crèmes.
- Gels.
- Pommades.

1.4 L'analyse des processus métiers de l'entreprise

Cette étape a été essentielle pour identifier les besoins fonctionnels de l'ERP. Aussi, l'analyse a été réalisée en collaboration avec les différents acteurs de l'entreprise, notamment les responsables des services suivants :

- **Achats :** Gestion des achats de matières premières et de composants
- **Stockage :** Gestion des stocks de médicaments et de matières premières
- **Planification :** Gestion des besoins en matière première et planification des ordres de fabrication.
- **Production :** Gestion de la production des médicaments

1.4.1 Etat des lieux

Le laboratoire de fabrication de médicaments est l'installation complète qui couvre toutes les étapes du processus de fabrication, depuis la réception des matières premières jusqu'au stockage des produits finis. Il occupe une superficie de 1900 m² et est réparti sur plusieurs niveaux.

1.4.1.1 Organisation des espaces de stockage

- **Système d'entreposage en rayonnages :**Les produits sont stockés dans des cellules codées identifiées par des lettres alphabétiques (par exemple, EQ033).
  - EQ désigne la rangée
  - 033 désigne le numéro de la cellule (numéro de travée et numéro de niveau)
- **Dimensions des palettes :** 1,2 m x 1 m
  - Une cellule peut contenir deux palettes ou une seule palette.
- **Température de stockage :** Température ambiante (25°C)

1.4.1.2 Répartition des produits par étage

- **Sous-sol :** Magasin de stockage des produits d'importation
- **Rez-de-chaussée :** Magasin de stockage des matières premières et des produits finis
- **2e étage :** Magasin de stockage des articles de conditionnement

Entrepôt supplémentaire : Un entrepôt supplémentaire pour le stockage des produits finis et d'une partie des matières premières est situé à Sidi Moussa.

Lignes de production : Les lignes de production sont situées au sous-sol et au premier étage.

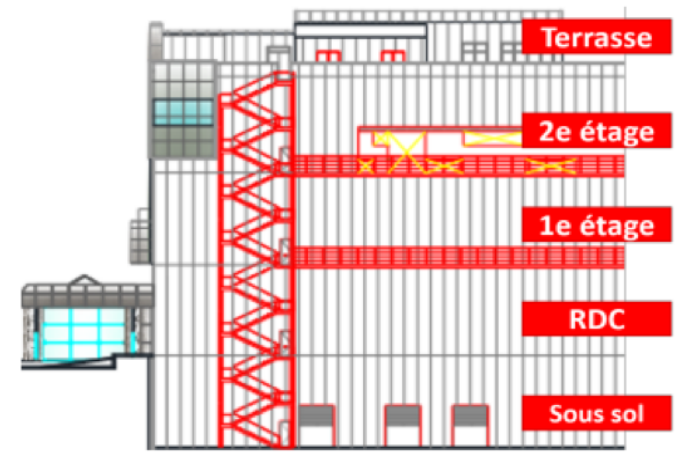


FIGURE 1.2 – Façade latérale de l'usine El KENDI [47]

1.4.1.3 Organisation par zone

- Zone de réception
- Zone des produits enquarantaine
- Zone des produits acceptés
- Zone des produits rejetés
- Zone psychotrope
- Zone produit fini
- Zone chambre froide
- Zone produits consommable
- Zone de pesée

Voir annexe A 2, A 3, A 4, A 5, A 6.

1.4.2 Produit psychotrope

Sous le terme de médicaments psychotropes, on désigne les médicaments qui agissent sur l'état du système nerveux central en modifiant certains processus cérébraux. Il s'agit globalement des médicaments utilisés pour traiter des troubles mentaux banals ou graves

et dans le cadre du traitement de la douleur. « Médicaments psychotropes : consommations et pharmacodépendances Une expertise collective de l'Inserm, 2012 ».[11]

En Algérie, la prescription et la délivrance des médicaments psychotropes sont régies par un cadre réglementaire strict, défini par plusieurs textes de loi et décrets. Ce cadre vise à encadrer l'utilisation de ces médicaments à des fins thérapeutiques tout en limitant les risques de mésusage et d'abus.

Textes de loi pertinents :

- Décret exécutif n° 19-379 du 4 Joumada El Oula 1441 correspondant au 31 décembre 2019 fixant les modalités de contrôle administratif, technique et de sécurité des substances et médicaments ayant des propriétés psychotropes.
- Arrêté du ministre de la Santé, de la Population et de la Réforme hospitalière du 25 chaâbane 1438 correspondant au 18 mai 2017 portant liste des substances psychotropes.

1.5 Les flux physiques dans les magasins

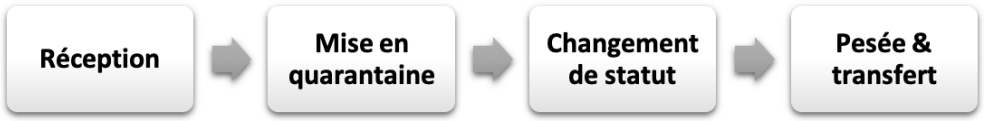


FIGURE 1.3 – Flux physiques dans le magasin

1.5.1 Réception

Le processus de réception des marchandises, qu'il s'agisse de matières premières, produits finis ou articles de conditionnement, constitue l'étape initiale. Un agent, préalablement désigné et informé par le département des achats de l'arrivée des produits, est chargé de cette réception.

Dans un second temps, le magasinier procède à deux vérifications successives sur la marchandise reçue : un contrôle physique suivi d'un contrôle documentaire.
Le contrôle physique comprend des vérifications quantitatives visant à détecter immédiatement toute anomalie, ainsi que des vérifications qualitatives limitées à l'examen visuel de l'absence de dommages liés au transport. À cette étape, des opérations annexes peuvent être menées, telles que l'étiquetage des boîtes non identifiées et le re-filmage des palettes après déconditionnement pour inspection.

Le contrôle documentaire implique la vérification d'une série de documents obligatoires accompagnant chaque réception : bon de commande, bon de livraison, liste de colisage et certificat d'analyse.

Une fois ces étapes franchies, la marchandise est transférée vers la zone de quarantaine. Le magasinier consigne alors les résultats des contrôles sur support papier (cahier historique appelé "log book") comme l'illustre les annexes : A 7,A 8, A 9 et dans le système de gestion des stocks (Microsoft Dynamics AX), assurant ainsi la traçabilité et la mise à jour des niveaux de stocks.

1.5.2 Mise en quarantaine

Les produits en quarantaine ne peuvent être utilisés pour la fabrication, n'ayant pas encore été soumis au contrôle qualité par l'unité compétente. À cet effet, un prélèvement est effectué sur chaque numéro de lot reçu, en vue de valider ou rejeter la marchandise acquise. Il convient de noter que le numéro de lot est un code interne attribué par le magasin pour chaque réception, distinct de celui du fournisseur.

À titre d'exemple, pour un excipient, le plan d'échantillonnage suit la formule $p=\sqrt{(n+1)}$, où p représente le nombre d'échantillons prélevés et n la quantité reçue. Par ailleurs, cette marchandise est assortie d'une date dite "date re-test", fixant l'échéance à laquelle sa conformité devra être revérifiée pour en permettre l'utilisation. Également, une partie du lot est mise en réserve sans être utilisée, pour des raisons de traçabilité en cas de problème futur.

1.5.3 Changement de statut

À l'issue du contrôle qualité, deux scénarios se présentent concernant le statut du lot réceptionné. Dans le cas où les résultats indiquent une non-conformité du produit aux spécifications, le lot est rejeté. Le chef magasinier procède alors à un retour fournisseur si ce dernier est local.
Cependant, pour un fournisseur étranger, une procédure distincte est appliquée. La marchandise rejetée voit son étiquette de quarantaine jaune remplacée par une étiquette rouge spécifique.

D'autres cas de figure peuvent également motiver le rejet d'une marchandise, comme le dépassement de la date de péremption. Dans le second scénario, si le lot est validé à l'issue des tests qualité, l'étiquette verte "conforme" lui est apposée. Le produit est alors déplacé vers la zone de stockage des matières premières acceptées.
Parallèlement, la mise à jour du statut et de la localisation du lot doit être effectuée dans le système de gestion.

Cette procédure rigoureuse de contrôle et de tri garantit l'utilisation exclusive de matières premières et produits conformes aux exigences réglementaires dans le processus de fabrication pharmaceutique, préservant ainsi l'intégrité et la sécurité des médicaments produits.

1.5.4 Pesée & transfert

Le lancement des ordres de fabrication (OF) déclenche l'envoi d'une demande par l'unité de production au magasin, spécifiant la liste des matières premières requises ainsi

que leurs quantités, références et autres détails pertinents. Cependant, avant leur acheminement vers la ligne de production concernée, ces matières doivent transiter par l'unité de pesée.
À cette étape, seules les quantités strictement nécessaires sont prélevées des contenants (barils, sacs, etc.), le reliquat étant remis en stock. Le prélèvement est alors transféré vers la ligne de production via un ordre de transfert interne. Le reste des matières est reconditionné de manière appropriée et les quantités résiduelles sont mises à jour dans le système de gestion des stocks (ERP).

Cette procédure de prélèvement fractionné permet d'optimiser la gestion des stocks en évitant le gaspillage et en assurant un suivi précis des quantités disponibles. Elle contribue également à la maîtrise des coûts de production en n'engageant que les strictes quantités requises.

En ce qui concerne les articles de conditionnement, ils sont acheminés directement vers le site de production. De plus, on ajoute un surplus de 3% afin de compenser les potentielles défectuosités ou gaspillages qui pourraient survenir lors de cette étape de fabrication.

1.6 Achat et approvisionnement

1.6.1 Approvisionnement

Le processus d'approvisionnement décrit toutes les étapes nécessaires pour fournir à une entreprise les biens et services dont elle a besoin. Il comprend des activités stratégiques et opérationnelles pour l'achat de biens.

Le processus d'achat représente la partie amont de la chaîne d'approvisionnement, constituant l'aspect opérationnel du processus d'approvisionnement. Il est essentiel pour assurer la qualité et la continuité des approvisionnements en matières premières, équipements et services nécessaires à la production de médicaments.

1.6.2 Identification des besoins

- Le département Approvisionnement utilise des données historiques et des prévisions pour estimer les quantités nécessaires en matières premières, articles de conditionnement, etc.
- Les différents départements de l'entreprise (R&D, production, qualité, entrepôt, maintenance) expriment leurs besoins spécifiques.
- Le département demandeur présente une demande d'achat (avec les spécifications techniques du produit demandé) au département Achat & Approvisionnement.

1.6.3 Sélection des fournisseurs

- Identifier les fournisseurs potentiels.
- Évaluation basée sur leur capacité, réputation, certification, et conformité aux réglementations.

- Rédaction du cahier des charges détaillé et envoi aux fournisseurs présélectionnés.
- Évaluation des offres : Analyse des réponses des fournisseurs en termes de coût, qualité, délais de livraison, et d'autres critères établis par les responsables.

1.6.4 Sélection

- **Sélection finale :** Choix du fournisseur le plus adapté en fonction des critères établis.

1.6.5 Commande et approvisionnement

- Envoi du bon de commande (PO - Purchase Order) au fournisseur sélectionné.
- Suivi de l'état de la commande pour s'assurer du respect des délais et des conditions.

1.6.6 Paiement et clôture

- Vérification des factures par rapport aux bons de commande et aux bons de livraison.
- Paiement des fournisseurs selon les termes négociés.
- Archivage des documents et analyse post-achat pour évaluation des performances des fournisseurs.

Au sein de l'entreprise ELKendi pharma, le département Procurement assure l'achat et l'approvisionnement des besoins de l'entreprise en ce qui concerne : les matières premières, les articles de conditionnement, les équipements, les pièces de rechanges, les produits chimiques, et les différents consommables et prestations des services.
Le processus achat est en général le même pour tous types de produits, mis à part quelque détails technique et réglementaires qui diffèrent selon la nature de l'achat, pour cela on distingue :

- **La matière première et les articles de conditionnement :** La demande vient du service planning du département Supply Chain et concerne les produits de routine, ces demandes sont généralement régulières mais parfois ne peuvent pas être assez anticipés à cause de la volatilité du marché.
- **Les équipements et les pièces de rechange :** Les demandes sont généralement régulières notamment pour les PDR et les consommables à l'exception des investissements.
- **Les achats LCQ (Laboratoire Contrôle Qualité) :** Passent toujours par la procédure de prospection qui sert à la recherche des nouveaux fournisseurs et assurer les meilleures offres en termes des coûts et délais.

1.7 Production et planification

Le département Supply Chain joue un rôle essentiel dans la chaîne logistique de l'entreprise. Ses principales missions consistent à surveiller les niveaux de stocks des matières premières et des articles de conditionnement afin d'anticiper leurs approvisionnements. Cela permet d'éviter les ruptures de stock tout en veillant à ne pas surcharger les espaces de stockage par des quantités excessives.

Une des difficultés majeures réside dans la gestion des délais de livraison, particulièrement pour les produits importés depuis des fournisseurs étrangers. Il faut en effet prendre en compte le temps nécessaire pour passer la commande, le transport et le dédouanement. Des retards imprévus peuvent également perturber les plans opérationnels d'approvisionnement. L'approvisionnement des produits locaux, qui représente une part importante des articles de conditionnement, est quant à lui plus simple à gérer.

Le plan d'approvisionnement est établi sur une base annuelle. Les quantités nécessaires sont communiquées au responsable des achats, qui se charge d'approvisionner l'usine auprès des différents fournisseurs [14].

1.7.1 Planification

Pour répondre aux besoins des clients, le département commercial fournit un plan prévisionnel des ventes (PIC) couvrant les 18 prochains mois. Sur la base de ce plan, le département Supply Chain établit un plan de production trimestriel en calculant le volume global à produire annuellement.

Une autre tâche importante pour les chargés de planification est la programmation des ordres de fabrication et de conditionnement, en collaboration avec l'unité d'ordonnancement. Cela permet d'assurer les quantités prévisionnelles à produire, en tenant compte de la capacité des trois lignes de production (deux anciennes et une nouvelle plus performante), des stocks de matières premières, des délais de fabrication et d'autres facteurs comme les temps de réglage et de nettoyage. Deux plans sont ainsi élaborés :

- Le plan de fabrication (Manufacturing planning) sur une base mensuelle.
- Le plan de conditionnement (Conditioning planning) également sur une base mensuelle.

À partir des plans de fabrication et de conditionnement, un micro-plan hebdomadaire est élaboré et communiqué aux départements Production, Contrôle Qualité et Assurance Qualité. Ce micro-plan détaille les éléments suivants :

- Les formes et désignations des médicaments à produire.
- Les salles dédiées à la fabrication ou au conditionnement de chaque médicament.
- Le nombre de lots à fabriquer ou à conditionner par médicament.
- Les dates de lancement de la fabrication des médicaments.

Le département Supply Chain transmet également au Contrôle Qualité un plan de libération des matières premières (MP) et articles de conditionnement (AC) afin que leurs composants soient analysés à temps pour le démarrage de la production.

Pour permettre le prélèvement des MP et AC, le département Production communique un plan de pesée hebdomadaire à l'Ordonnancement. Celui-ci prépare alors l'Ordre de Fabrication (OF) et l'Ordre de Conditionnement (OC) à partir de la nomenclature (Bill of Material - BoM) issue du document Recherche et Développement (RD).

- L'OF détaille toutes les étapes de la phase de fabrication.

- L'OC précise le nombre de caisses par lot, les quantités d'AC par lot, les étapes de conditionnement et les vérifications à effectuer.
- Le RD spécifie les contrôles, ingrédients, articles de conditionnement, machines, tâches des ouvriers et quantités nécessaires.

Tous ces documents sont vérifiés par le service Assurance Qualité Documentation avant diffusion sur le réseau intranet de l'entreprise.

L'OF est transmis avant chaque étape de fabrication et repris à la fin pour constituer le dossier de lot de production (BMR - Batch Manufacturing Record). De même, l'OC est transmis avant conditionnement pour la constitution du dossier de lot de conditionnement (BPR - Batch Packaging Records).

Le Contrôle Qualité transmet au département Complaintes le certificat d'analyse de lot. L'Assurance Qualité fournit le BMR et le BPR constituant le dossier de lot complet. Le département Complaintes délivre alors le certificat de libération de lot (CLL) à l'Assurance Qualité.

Enfin, un bon de transfert est émis au magasinier pour libérer les produits finis vers les entrepôts du site avant expédition vers l'entrepôt de distribution à Sidi Moussa.

1.7.2 Assurance Qualité

Avant le lancement de chaque étape, l'Assurance Qualité doit vérifier que les conditions des salles et des machines soient conformes (pression, température, humidité, réglages, état de propreté...). Elle contrôle également les spécificités des produits en cours (uniformité de masse, friabilité...). Si les conditions des salles et des équipements ne sont pas satisfaisantes, l'Assurance Qualité est en droit d'exiger des opérateurs qu'ils procèdent à un nouveau nettoyage approfondi. On distingue deux types de nettoyage :

- Type B (entre 2 lots) - Durée maximale d'une heure .
- Type C (entre chaque produit) - Pouvant nécessiter 1 à 2 équipes de travail.

Ces vérifications rigoureuses de l'Assurance Qualité garantissent le respect des normes de qualité tout au long du processus de production.

1.7.3 Processus de fabrication des médicaments :

Une fois que les matières premières nécessaires au lancement de la fabrication ont été réceptionnées, provenant d'un monte-charge qui relie verticalement l'entrepôt et le laboratoire de production, le processus se déroule comme suit :

1. **Pré-mélange :** C'est l'étape initiale où l'on prépare le mélange préliminaire contenant les ingrédients de base nécessaires à la composition du médicament.
2. **Compactage et broyage :** Le pré-mélange est introduit dans une machine qui le compacte pour lui donner une forme de comprimé avec une certaine dureté. Ces comprimés sont ensuite broyés dans la même machine pour obtenir un mélange de densité supérieure.
3. **Mélange final et lubrification :** On ajoute d'autres ingrédients au mélange existant et on vérifie la concentration du principe actif.

4. **Compression :** Cette étape consiste à comprimer le mélange dans une machine pour produire les comprimés finaux tout en respectant les spécifications requises (poids moyen, dureté, apparence, etc.).
5. **Pelliculage :** Les comprimés sont transférés dans une machine où un antioxydant est pulvérisé sur eux. Cela permet d'augmenter leur dureté.

Il est important de noter qu'après chaque étape, le produit est entreposé en vrac dans l'entrepôt de production, en attendant que la préparation de la salle suivante soit terminée. On distingue différents états pour les salles de fabrication :

- Fabrication : Lorsque la production est en cours.
- Propre : Après un nettoyage complet de la salle.
- Nettoyage : Lorsque la salle est en cours de nettoyage
- Maintenance : Au début de chaque mois, pour l'entretien des équipements.
- Hors service : Lorsque la salle n'est pas utilisée pour la production.

Cela permet d'assurer un flux de production continu tout en maintenant des normes strictes d'hygiène et de maintenance dans les différentes salles de fabrication.

1.7.4 Conditionnement

Après l'étape de fabrication, le produit est transféré dans la salle de conditionnement où il est placé dans des fûts avec les articles nécessaires au conditionnement. Ensuite, le processus suivant est mis en œuvre :

1. **Conditionnement primaire :** Le produit en vrac est introduit dans une machine qui dépose les comprimés sur une alvéole en plastique (PVC), puis les scelle hermétiquement avec une feuille d'aluminium.
2. **Conditionnement secondaire :** Les alvéoles individuelles (blisters) sont regroupées, enveloppées avec la notice d'utilisation, puis insérées dans une boîte cartonnée après vérification que la notice est bien collée. Cela constitue la boîte finale du médicament. (Le conditionnement primaire et secondaire s'effectue sur la même machine, représentée par un seul élément.)
3. **Conditionnement tertiaire :** Les boîtes de médicaments sont déposées dans des caisses en carton, permettant ensuite la préparation des palettes pour l'expédition du produit fini.

1.8 Généralités sur la gestion de projet

1.8.1 Définition d'un projet

La norme ISO 21500 définit un projet comme un ensemble unique de processus consistant en des activités coordonnées et contrôlées, avec des dates de début et de fin, exécutées pour réaliser les tâches du projet.[35]

D'après le livre GUIDE PMBOK (Project Management Body of Knowledge) : « Un projet est une initiative temporaire entreprise dans le but de créer un produit, un service ou un résultat unique. »[39]

Selon AFITEP Association Francophone de Management de Projet) AFNOR (Association Française de Normalisation) : « ensemble d'actions à réaliser pour satisfaire un objectif défini, dans le cadre d'une mission précise, et pour la réalisation desquelles on a identifié non seulement un début, mais aussi une fin. »[32]

1.8.2 Caractéristiques d'un projet

Selon [32], on peut les représenter comme suit :
Objectif clair et défini : Tout projet débute avec un objectif précis, qu'il s'agisse de développer un nouveau produit, d'améliorer un processus existant ou de répondre à un besoin spécifique. Cet objectif sert de cap et permet de guider l'ensemble des actions et des décisions tout au long du projet.

Production de livrables : Les projets aboutissent à la création de livrables concrets et mesurables. Ces livrables peuvent prendre différentes formes : un produit fini, un service mis en place, un rapport d'étude, etc. Ils représentent la concrétisation des efforts déployés et l'atteinte des objectifs fixés.

Début et fin définis : Chaque projet a une durée déterminée, avec une date de début et une date de fin clairement établies. Cette notion de temporalité est essentielle pour planifier les ressources, cadrer les actions et maintenir l'équipe focalisée sur les objectifs.

Inducteur de changement : Les projets sont par nature des vecteurs de changement. Ils permettent d'introduire de nouvelles solutions, d'optimiser des processus ou de modifier des structures existantes au sein d'une organisation. Cette capacité à transformer l'existant est un élément clé de la valeur des projets.

Création de valeur : La réussite d'un projet se mesure à sa capacité à générer de la valeur pour ses parties prenantes. Cette valeur peut être d'ordre financier, stratégique, opérationnelle ou sociétale. Elle représente l'impact positif du projet sur son environnement.

Contexte d'initiation : Les projets ne naissent pas de manière isolée. Ils trouvent leur origine dans des facteurs internes ou externes à l'organisation, tels que l'évolution des besoins du marché, l'émergence de nouvelles technologies, les contraintes réglementaires ou les demandes des parties prenantes. Comprendre le contexte d'initiation est nécessaire pour définir pertinemment les objectifs et les contours du projet.

1.8.3 Gestion de projet

La gestion de projet est l'application de méthodes, d'outils, de techniques et de compétences sur un projet. Elle comprend l'intégration des différentes phases du cycle de vie du projet, qui couvre la période allant du début du projet à sa fin.

Selon la norme ISO 21500, la gestion de projet fournit un cadre organisationnel pour aider à atteindre les objectifs business. Elle est considérée comme une discipline dont le but est d'atteindre des objectifs spécifiques, en planifiant, organisant, motivant et contrôlant les ressources.[35]

La gestion d'un projet tout au long de son cycle de vie implique une série d'activités de management appelées processus de management de projet. Chacun de ces processus prend des données d'entrée, les traite à l'aide d'outils et techniques appropriés, et produit des données de sortie. Ces données de sortie peuvent être des livrables tangibles ou des réalisations intangibles, qui constituent le résultat final du processus. Bien que spécifiques à chaque projet, ces processus de gestion de projet sont applicables de manière universelle, quel que soit le secteur d'activité. Ils permettent de structurer et piloter méthodiquement les différentes phases du cycle de vie.[39]

1.8.4 Cycles de vie du projet

Le cycle de vie d'un projet est la série de phases que celui-ci traverse, depuis son lancement jusqu'à sa clôture. Il fournit un cadre de référence pour manager le projet, quelle que soit la nature du projet concerné. Les phases sont effectuées de façon séquentielle, itérative ou en parallèle.[39]

1.8.4.1 Phase de projet

Une phase de projet est un ensemble d'activités du projet liées logiquement qui aboutit à l'achèvement d'un ou de plusieurs livrables. Les phases d'un cycle de vie peuvent être décrites par divers attributs. Les attributs sont mesurables et propres à une phase en particulier.[39]

1.8.4.2 Porte de phase

La revue de phase, aussi connue sous le nom de "porte de phase", constitue un jalon essentiel dans le cycle de vie d'un projet. Elle intervient à la clôture d'une phase et vise à évaluer les performances et l'avancement du projet en regard des objectifs définis au départ. Cette évaluation se base sur une analyse approfondie des documents clés du projet.[39]

1.8.4.3 Les phases d'un projet

Le développement d'un système informatique, comme tout projet, se déroule de manière progressive et structurée. Il commence par une phase de cadrage, où l'on définit précisément les objectifs visés, le budget alloué et les délais à respecter. Une fois ces paramètres validés par les parties prenantes, le projet entre dans une phase de préparation pour organiser sa mise en œuvre concrète.
S'ensuivent alors quatre grandes étapes dans le cycle de vie du projet :

- **La préparation,** pour fixer les contours exacts du travail à réaliser.
- **Le lancement,** afin de planifier les détails opérationnels et mobiliser les ressources requises.
- **La réalisation proprement dite,** en suivant toutes les étapes de production jusqu'à la livraison finale.
- **La clôture,** pour transmettre les livrables au client et capitaliser le retour d'expérience.

[15]

FIGURE 1.4 – Phases du projet

Une continuité rigoureuse est indispensable tout au long de ce processus, tant au niveau de la méthodologie suivie que de la composition de l'équipe projet. Toute rupture entraînerait une révision complète des moyens, délais et coûts accordés. Les phases doivent se succéder sans chevauchement ni délai excessif pour éviter de remettre en cause les décisions précédentes.

1.8.5 Caractéristiques d'un projet système d'information

Les systèmes d'information revêtent une nature intrinsèquement complexe, comme l'illustre leur définition : "un ensemble organisé de ressources (matérielles, logicielles, humaines, données, procédures...) permettant d'acquérir, traiter, stocker et communiquer des informations sous diverses formes (données, textes, images, sons...) au sein des organisations".[42] Leur caractère immatériel rend d'autant plus ardue l'obtention d'une description précise. Cette complexité particulière impacte inévitablement la gestion des projets visant à les développer.
En effet, le triptyque classique objectif, moyens, délais qui structure tout projet présente, dans le domaine des systèmes d'information, trois spécificités majeures :

Premièrement, ces trois composantes sont étroitement liées et interagissent. L'identification initiale des objectifs conduit à une estimation de la charge globale, permettant de définir une échéance cible théorique et les moyens requis. Cependant, des contraintes peuvent amener à revoir l'ampleur des objectifs selon le principe du "design-to-cost". Les paramètres moyens et délais sont alors fixés, servant de référence pour évaluer l'efficience du projet.

Deuxièmement, et de manière paradoxale, les objectifs ne sont parfaitement déterminés qu'une fois le projet achevé. En effet, la nature abstraite d'un système d'information le rend difficilement représentable de façon exhaustive. Les modèles, maquettes et prototypes n'en donnent qu'une vision partielle, une analogie simplifiée. Cette indétermination tranche avec les objets industriels qui ont servi de référence aux techniques classiques de gestion de projet.

Troisièmement, le développement s'inscrit dans un contexte organisationnel spécifique qui impacte le déroulement du projet. Les comportements des acteurs sont influencés par la structure de pouvoir, la répartition des ressources, la division des tâches et les procédures en vigueur. Des jeux d'influence, stratégies individuelles ou de groupes d'intérêts

émergent inévitablement dans les zones d'incertitude, au-delà de la rationalité d'optimisation généralement privilégiée. Le processus de développement revêt ainsi des dimensions politiques et psychologiques trop souvent négligées.

En somme, la conduite de projets de systèmes d'information requiert une approche résolument pluridimensionnelle. Aux aspects techniques et rationnels classiques doivent s'ajouter une prise en compte des réalités organisationnelle, politique et psychologique pour appréhender pleinement la complexité inhérente à ce type de projets. [32]

1.8.6 Difficultés des projets ERP et modélisation d'entreprise

Les projets de mise en place d'un système de gestion intégré (ERP) sont des initiatives d'envergure visant à déployer une solution informatique permettant de supporter les principales fonctions de gestion d'une entreprise. Ces projets se déroulent en plusieurs phases impliquant la mobilisation de ressources internes et externes.

Une étude alarmante du Standish Group en 1999 évaluait à 31% le taux d'échec complet des projets ERP. D'autres analyses ont souligné les faibles retours sur investissement constatés et mis en garde contre les risques inhérents.

Bien que cruciaux pour la performance des organisations, les projets ERP sont réputés pour leur complexité et leurs difficultés de mise en œuvre. De nombreux projets de déploiement de systèmes ERP se sont avérés difficiles, voire des échecs patents. Les résultats escomptés sont rarement atteints et les budgets et calendriers très souvent dépassés, ainsi qu'une insatisfaction vis-à-vis de la solution déployée. Selon une enquête de 2011 (Panorama Consulting Group 2012), 56% des projets ont dépassé leur budget initial, 54% ont connu des retards et 44% n'ont réalisé que moins de la moitié des bénéfices escomptés.

Face à ces défis, de nombreuses études ont identifié les facteurs de risque pouvant compromettre la réussite d'un projet ERP. Une trentaine de ces facteurs ont été répertoriés, allant de l'inadéquation des ressources allouées aux lacunes en gestion de projet, en passant par les résistances au changement.

Au-delà des problématiques techniques liées à la richesse fonctionnelle des ERP et à la complexité de leur paramétrisation, les projets se heurtent fréquemment à des résistances internes. Les changements organisationnels induits et les budgets de développement supplémentaires suscitent blocages et conflits entre les différentes parties prenantes.

La multiplicité des intervenants constitue l'une des premières difficultés de ces projets transversaux. Une modélisation rigoureuse des processus et une définition précise des besoins fonctionnels en amont s'avèrent indispensables, notamment lors des étapes de spécification des exigences et de sélection de la solution ERP.

Les petites entreprises font également face à des défis spécifiques lors de l'implémentation d'un ERP, avec des contraintes budgétaires et des ressources souvent limitées. Une approche sur mesure, adaptée à leur contexte, est nécessaire pour maximiser les chances de succès.

Néanmoins, selon une enquête de 2010 du Panorama Consulting Group, plus des deux tiers des 1600 organisations interrogées, publiques et privées, ont jugé leur projet ERP conforme aux objectifs fixés initialement. Ce résultat encourageant témoigne des efforts déployés par les entreprises pour assurer un déploiement efficace. [26] [30]

1.9 Motivations du projet

Le principal facteur de motivation derrière le choix de ce projet ambitieux réside dans le défi même qu'il représente pour nous. Concevoir et mettre en œuvre une solution ERP de bout en bout constitue un immense challenge technique et informatique que nous sommes désireux de relever. De la modélisation des processus métiers à l'intégration des flux d'information en passant par l'optimisation des ressources, chaque étape requiert une expertise approfondie et une réflexion méthodique. C'est précisément l'ampleur de ce projet d'envergure qui a aiguisé notre motivation et notre volonté de repousser nos limites.

La passion qui nous anime pour la résolution des problèmes d'optimisation par des méthodes de recherche opérationnelle variées a également nourri notre élan. Cette passion, initiée lors de notre formation d'ingénieurs où nous avons exploré ces concepts fascinants, s'est muée en un véritable engouement pour les appliquer concrètement à travers ce défi stimulant.

Nos expériences professionnelles ponctuelles avec des systèmes ERP, bien que modestes, ont aussi renforcé notre désir d'approfondir nos compétences dans ce domaine complexe. Nous sommes impatients de nous attaquer aux multiples défis conceptuels et techniques inhérents au développement d'un tel outil.

Enfin, le mentorat avisé de nos professeurs encadrants a grandement influencé ce choix audacieux. Leurs conseils experts et leur soutien indéfectible ont nourri notre détermination à relever ce défi de taille et mener à bien ce projet aussi exigeant que gratifiant.

1.10 Problématique

La société EL KENDI a précédemment tenté d'adopter deux systèmes de gestion intégrés, Oracle et Microsoft AX 2012. Cependant, ces initiatives se sont soldées par des échecs, en raison de diverses difficultés techniques et organisationnelles rencontrées.

Actuellement, les échanges d'informations en interne s'effectuent principalement via l'intranet de l'entreprise. Bien qu'informatisé, ce mode de communication s'avère insuffisant pour une structure de la taille d'EL KENDI.

La création des différents plans opérationnels repose quant à elle sur Microsoft Excel. Malgré la polyvalence de ce tableur, le volume conséquent de données à traiter dans l'industrie pharmaceutique rend son utilisation inadaptée pour l'automatisation des tâches récurrentes.

Face à ces limites, le déploiement d'un véritable système d'information intégré, disposant d'une riche suite fonctionnelle modulaire, apparaît désormais essentiel pour EL KENDI. Une telle mise en œuvre s'impose pour permettre à l'entreprise d'améliorer significativement sa productivité et sa performance globale.

Pour fluidifier son flux de travail, EL KENDI a identifié la nécessité de déployer un nouveau système de gestion intégré (ERP) permettant d'unifier habilement l'ensemble des processus de l'entreprise au sein d'un système d'information complet auquel les individus de l'ensemble de l'organisation peuvent accéder facilement.

Cette nouvelle solution ERP doit répondre aux attentes des différents utilisateurs en centralisant les informations dans une base de données unique et en automatisant les tâches et opérations spécifiques à chaque service.

L'objectif de ce projet est de concevoir un ERP améliorant les performances de la chaîne logistique grâce à l'optimisation des flux physiques et informationnels. Il doit également servir d'outil d'aide à la décision, avec une interface moderne et conviviale.

Le lien essentiel entre la gestion de la chaîne logistique (SCM) et l'ERP conçu sera illustré au travers de plusieurs modules clés : gestion des stocks, transport, planification de production et gestion des achats. Ces différents modules constitutifs auront un impact profond sur l'ensemble des niveaux organisationnels d'El Kendi, aussi bien fonctionnel, opérationnel qu'organisationnel.

1.11 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de plonger au cœur des réalités d'EL KENDI et de l'industrie pharmaceutique. Notre analyse a mis en lumière les forces de l'entreprise et les domaines d'amélioration potentielle, englobant les achats, la production et la logistique. La gestion de projet s'est révélée être un fil conducteur essentiel pour l'implémentation d'un ERP dans cet environnement exigeant.

La problématique dégagée reflète ces enjeux multiples et nous invite à repenser les processus d'EL KENDI de manière globale. C'est sur cette base que nous allons construire notre réflexion, avec l'objectif de concevoir une solution ERP répondant aux besoins actuels de l'entreprise tout en anticipant ses évolutions futures.

Cette compréhension approfondie du contexte prépare ainsi le terrain pour une conception et une implémentation adaptée aux spécificités d'EL KENDI dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Les ERP

2.1 Intoduction

Les systèmes de planification des ressources entreprises, plus connus sous l'acronyme ERP (Enterprise Resource Planning), constituent aujourd'hui l'épine dorsale des systèmes d'information dans de nombreuses organisations. Initialement conçus pour les processus manufacturiers, les ERP se sont rapidement étendus pour couvrir l'ensemble des fonctions de l'entreprise, de la gestion de la Supply Chain aux services financiers en passant par les ressources humaines et la relation client.

L'objectif principal d'un ERP est de fournir un système d'information intégré et unifié permettant d'automatiser et d'optimiser les processus opérationnels clés de l'entreprise. En centralisant les données au sein d'un référentiel unique et en assurant un partage d'informations en temps réel entre les différents services, le système ERP permet d'accroître l'efficacité, la productivité et la réactivité de l'ensemble des collaborateurs. Il contribue ainsi à apporter de la valeur ajoutée aux différentes parties prenantes en alignant les processus sur la stratégie de l'entreprise, dans une optique de retour sur investissement rapide et pérenne. [18]

La mise en œuvre d'une solution ERP ne doit cependant pas être considérée comme un simple projet informatique. Il s'agit avant tout d'un profond changement organisationnel qui impacte les processus métiers, les pratiques opérationnelles et jusqu'aux rapports de force au sein de l'entreprise. Un déploiement réussi nécessite une réelle vision stratégique, une conduite du changement maîtrisée et l'implication de l'ensemble des parties prenantes. Les compétences requises sont nombreuses et évolutives tout au long du cycle de vie du projet ERP.

Lorsqu'elle est correctement menée, une implémentation ERP apporte de nombreux bénéfices tels que des transactions plus rapides, une meilleure visibilité et un pilotage renforcé des activités grâce à une information fiable et consolidée en temps réel. L'intégration des processus clés permet d'identifier les goulots d'étranglement et d'optimiser continuellement les performances. Au final, l'agilité et la fluidité amenées par le système ERP se traduisent par un réel avantage compétitif et une nette amélioration de la rentabilité globale de l'entreprise.
Cependant, la mise en place d'un ERP représente un défi de taille pour les organisations. Les risques d'échec ou de dérapage des projets ERP sont bien réels et peuvent avoir des conséquences désastreuses. Une gestion rigoureuse du changement à tous les niveaux est primordiale pour garantir un retour sur investissement positif. [68]

2.2 Les Systèmes d'informations

2.2.1 Définition d'une information :

L'information est un élément de connaissance pouvant être matérialisé et représenté à l'aide de conventions afin d'être conservé, traité ou communiqué. C'est un phénomène humain qui réduit l'incertitude liée à une question ou modifie la perception de l'environnement. Dans le champ muséal, on distingue principalement trois formes : l'information-objet faisant référence aux objets, données et documents tangibles ; l'information-processus désignant les interactions, échanges et médiations où un esprit humain rend cette informa-

tion tangible intelligible, constituant la partie intangible et individuelle ; et l'information-connaissance, produit négocié et stabilisé de l'information-processus dans un cadre socio-culturel, guidant les actions et formant la partie collective qui transforme la connaissance en savoir, diffusé ensuite via de nouvelles informations-objets. Ainsi, l'information-objet est à la fois l'origine et le résultat tangible de la dynamique des informations-processus et connaissances. Dans le contexte entrepreneurial, les données stockées dans les systèmes informatiques sont la traduction codée d'informations, expliquant que les deux termes soient souvent considérés comme synonymes.[45]

2.2.2 Définition d'un system d'information :

D'un point de vue technique, un système d'information est défini comme un ensemble de composants interconnectés qui rassemblent, traitent, stockent et distribuent des informations pour faciliter la prise de décision, la coordination et le contrôle au sein d'une organisation.

Les systèmes d'information contiennent des données sur les personnes, les lieux et les objets importants au sein de l'organisation ou de son environnement. Le terme "information" désigne les données présentées sous une forme utile et utilisable par les personnes. D'autre part, les données sont des valeurs brutes représentant des événements qui se produisent à l'intérieur ou à l'extérieur des organisations. Elles n'ont pas encore été organisées de manière à ce que les utilisateurs puissent les comprendre et les utiliser.

Au sein d'un système informatique, la génération des données nécessaires à une organisation repose sur trois piliers fondamentaux : l'entrée, le traitement et la sortie. L'entrée constitue le point d'arrivée des données brutes, issues de l'organisation elle-même ou de son environnement. Ce qui constitue une "entrée" pour un système B peut être la résultante d'une saisie ou d'une sortie d'un système A. Le traitement intervient ensuite pour donner du sens à ces données brutes, les transformant ainsi en informations exploitables. Quant à la sortie, elle correspond à la phase de diffusion des informations traitées aux utilisateurs concernés. Ces processus peuvent s'enchainer en temps réel, se dérouler de manière asynchrone sur une période différée, ou encore s'adapter en fonction des besoins spécifiques. En outre, le système d'information s'appuie sur le principe de rétroaction, qui implique la transmission des informations générées aux utilisateurs appropriés, leur permettant ainsi d'évaluer et de réintervenir au besoin dans le processus en cours. [27]

2.2.3 Les fonctions du système d'information

Le système d'information (SI) d'une entreprise remplit quatre rôles fondamentaux.

Premièrement, l'acquisition des informations pertinentes, qu'elles proviennent de sources externes (organismes professionnels, médias, etc.) ou internes (services comptables, production, etc.). Ce processus implique la collecte initiale des données brutes, suivie d'une analyse permettant de filtrer l'essentiel, puis de l'entrée des informations retenues dans le SI.

Deuxièmement, la mémorisation pérenne de ces informations à l'aide de moyens techniques comme les bases de données et d'une organisation rigoureuse des méthodes d'ar-

chivage. Le SI constitue ainsi la mémoire vivante de l'entreprise.

Troisièmement, l'exploitation intelligente des données mémorisées en permettant leur traitement : recherche, mise à jour, croisement selon des règles de calcul prédéfinies pour en extraire de nouvelles informations à valeur ajoutée.

Enfin, quatrièmement, la diffusion efficace et opportune de ces informations traitées aux différents destinataires concernés, selon leurs besoins et sous un format directement exploitable.

En somme, le SI orchestre un cycle vertueux d'acquisition, capitalisation, valorisation et partage des informations clés pour l'entreprise. C'est un puissant catalyseur permettant de transformer des données éparses en une intelligence opérationnelle et stratégique au service de la performance globale.[51]

2.2.4 Types des systèmes d'information

On distingue deux grands types de systèmes d'information en entreprise selon leurs finalités.

D'une part, les SI opérationnels ont pour mission première d'automatiser et de fluidifier les activités quotidiennes au cœur du métier de l'entreprise. On y trouve les systèmes de gestion des transactions commerciales (ventes, achats, règlements), les solutions industrielles de pilotage et de contrôle des processus de production, ainsi que les outils de bureautique collaborative facilitant la communication et le travail en équipe.

D'autre part, les SI décisionnels sont dédiés à l'aide à la décision pour les managers et dirigeants. Ils fournissent une vision d'ensemble, des tableaux de bord et des analyses approfondies permettant d'éclairer la stratégie et d'orienter les choix.

Dans la pratique, la plupart des entreprises disposent d'applications informatiques intégrées couvrant à la fois les besoins opérationnels transactionnels, la bureautique, mais aussi des fonctionnalités décisionnelles. Cette convergence des systèmes d'information reflète la transversalité et l'interdépendance entre la gestion au quotidien et le pilotage stratégique dans les organisations modernes.[51]

2.2.5 La graduation des besoins informatiques et leurs réponses

Les différents types de besoins sont les suivants :

- **Les besoins individuels** sont exprimés par chaque personne individuellement. Ils peuvent être satisfaits s'ils correspondent aux intérêts de l'entreprise. Ces besoins varient d'une personne à l'autre.
- **Les besoins du groupe** ne sont généralement pas la somme des besoins individuels. Lorsque les besoins individuels convergent, des outils communs tels que la bureautique peut être utilisés pour y répondre de manière générale. La satisfaction de ces besoins collectifs implique l'intégration et le partage de ces outils communs, ce qui entre dans la catégorie de la bureautique intégrée.

- **Les besoins des métiers** découlent de la nécessité d'automatiser les tâches manuelles. Ils sont satisfaits par des solutions logicielles spécifiques à chaque secteur d'activité, telles que la CAO, la CFAO ou les suites de gestion comptable.
- **Les besoins de l'entreprise** ne sont ni la somme ni l'intégration des besoins de l'entreprise et du groupe. Ils résultent d'une expression coopérative des besoins et nécessitent une planification des différents processus qui contribuent au fonctionnement global de l'entreprise, ainsi qu'une mise en œuvre coopérative des solutions logicielles qui gèrent les différents domaines d'activité. [29]

2.2.6 Les niveaux de réponse des produits informatiques aux besoins des entreprises :

Les produits informatiques répondent aux besoins des entreprises à différents niveaux, en fonction de leur capacité à s'adapter aux spécificités organisationnelles et à fournir des fonctionnalités avancées :

Réponses fonctionnelles simples :
Ce niveau offre des fonctionnalités de base qui couvrent les besoins essentiels d'un processus ou d'une tâche spécifique. Les produits à ce niveau sont généralement peu onéreux et faciles à mettre en œuvre, mais ils ne s'adaptent pas aux particularités de l'organisation et n'offrent pas de fonctionnalités avancées.

Réponses complexes :
Ces solutions prennent en compte les spécificités de l'organisation et les règles de fonctionnement propres à chaque entreprise. Elles offrent un plus grand degré de personnalisation et d'adaptation, permettant une meilleure intégration aux processus existants. Les produits à ce niveau sont généralement plus onéreux et nécessitent une expertise plus poussée pour leur mise en œuvre et leur maintenance.

Réponses dynamiques :
Ce niveau permet une gestion efficace des flux d'informations et des interactions entre les différentes entités/services de l'entreprise. Les solutions dynamiques s'adaptent en temps réel aux changements de l'environnement et aux besoins évolutifs de l'organisation. Elles permettent d'optimiser les processus, de fluidifier la communication et de prendre des décisions plus éclairées.

Réponses de pilotage :
Ces solutions fournissent les informations et les outils nécessaires pour prendre des décisions stratégiques et piloter globalement l'activité de l'entreprise. Elles offrent des fonctionnalités de reporting avancées, d'analyse décisionnelle et de simulation de scénarios. Les produits à ce niveau sont généralement les plus onéreux et nécessitent une expertise approfondie pour leur mise en œuvre et leur utilisation. [29]

2.3 Définition d'un ERP

Selon Springer Gabler Verlag (2014), un ERP est "Un système de planification des ressources d'entreprise (système ERP) prend en charge tous les processus métier exécutés

dans une entreprise. Il contient des modules pour les domaines des achats, de la production, des ventes, de la gestion des actifs, des ressources humaines, des finances et de la comptabilité, etc., qui sont reliés entre eux via une base de données commune." [50]

Klaus, Rosemann, et Gable (2000) précisent que "le système ERP est un progiciel intégré composé d'un ensemble de modules fonctionnels standard (Production, Ventes, Ressources Humaines, Finance, etc.), développés ou intégrés par le fournisseur, qui peut être adapté aux besoins spécifiques de chaque client."[25]

Somers et Nelson (2003) soulignent que "les systèmes ERP sont les outils logiciels utilisés pour gérer les données de l'entreprise" et qu'ils "aident les organisations à gérer la chaîne d'approvisionnement, la réception, la gestion des stocks, la gestion des commandes clients, la planification de la production, l'expédition, la comptabilité, la gestion des ressources humaines et d'autres fonctions commerciales."[47]

Shanks, Seddon, et Willcocks (2003) mettent en avant que "les systèmes ERP sont différents des systèmes hérités en ce que les organisations utilisent l'ERP pour intégrer les informations à l'échelle de l'entreprise, soutenant les fonctions financières, des ressources humaines, de fabrication, de logistique et de vente et marketing."[46]

Enfin, Röthlin (2010) cite la définition de l'American Production and Inventory Control Society, qui décrit l'ERP comme "un progiciel qui assure une mise à jour en temps réel de l'ensemble des fonctions de l'entreprise, tant du point de vue des ordres d'achats, de ventes, que de la gestion des stocks et des produits en assurant un lien avec la finance et la charge des différentes ressources."[44]

Au-delà de la simple planification des ressources de production, les ERP visent à prendre en charge l'ensemble des processus d'une entreprise, y compris la conception de produits, la gestion des données, la planification des ressources, la gestion des capacités et les systèmes de communication. Qu'il s'agisse d'entreprises manufacturières ou de services, l'objectif est d'optimiser l'utilisation de toutes les ressources, y compris les ressources informationnelles.

Ces solutions permettent de responsabiliser les collaborateurs en leur fournissant des informations fiables et accessibles en temps réel, favorisant ainsi une prise de décision éclairée, ce qui est indispensable pour maintenir la compétitivité. En centralisant les données au sein d'un système unifié, les ERP facilitent également le partage des bonnes pratiques métier à l'échelle de l'entreprise.

Cependant, l'un des principaux défis associés aux ERP réside dans le fait que ces solutions imposent en partie leurs processus aux organisations qui les déploient. Cela soulève la problématique du niveau d'adaptation requis, un enjeu majeur lors de toute implémentation. Pour rester compétitives, les entreprises doivent optimiser leurs pratiques et fluidifier les échanges avec leurs partenaires.[49][4][40]

2.4 Origines et évolution des progiciels intégrés

Le concept de solution logicielle intégrée couvrant l'ensemble des processus d'une entreprise n'est pas nouveau. Dès les prémices de l'informatisation de la gestion de production, certains acteurs avaient développé des suites applicatives intégrées englobant, au-delà de la production à proprement parler, les fonctions commerciales, comptables et administratives. On évoquait alors la notion de trilogie entre la Gestion de Production, la Gestion Commerciale, Comptable et Financière, et la Gestion Administrative (GP-GCCF-GA).

Outre-Atlantique, on utilisait le terme Manufacturing Resource Planning (MRP) pour désigner la planification des moyens de production, ce qui couvrait, au-delà des activités manufacturières, la gestion du plan directeur de production, des ressources humaines et équipements, des stocks, des approvisionnements, des commandes, de la logistique...

Naturellement, les MRP s'adaptaient aux différentes méthodes de gestion de production (flux tendus, Kanban, flux continus, production sur projet ou à la commande, etc.). Les ERP (Entreprise Resource Planning) constituent en réalité une généralisation des MRP, visant à prendre en charge l'intégralité des processus d'une entreprise : gestion des ressources humaines, comptabilité et finance, administration, ventes, achats, production et logistique. [29]

Dans le domaine de la fabrication, la stratégie de gestion des opérations, sous l'égide des technologies de l'information, a évolué à travers quatre phases majeures. Chaque étape a représenté une avancée significative dans la façon dont les entreprises planifient et gèrent leurs processus de production. Ces évolutions reflètent une transition graduelle vers une approche plus intégrée et centrée sur l'efficacité opérationnelle. Ainsi, depuis les premières méthodes axées sur la planification des besoins en matériaux jusqu'aux approches modernes de gestion des ressources d'entreprise, l'histoire de la gestion de la fabrication est marquée par un progrès constant, dicté par les avancées technologiques et les exigences changeantes du marché.

L'évolution de la stratégie de gestion des opérations, soutenue par les technologies de l'information, s'est articulée autour de quatre phases principales :

- **MRP (Material Requirements Planning - 1970-1980) :** Cette approche se concentre sur la gestion interne des opérations, en mettant l'accent sur les matériaux et en s'appuyant sur les technologies de l'information. Elle repose sur la conceptualisation des activités de production en termes de processus liés aux matériaux, incluant la fabrication, l'assemblage et la gestion des stocks. Le MRP utilise des bases de données produits (nomenclatures) et inventaires.
- **MRP II (Manufacturing Resource Planning - 1980-1990) :** Cette stratégie élargit la perspective de gestion interne vers la fabrication, toujours soutenue par les technologies de l'information. Elle se base sur la conceptualisation des activités de fabrication en termes de fonctionnalités et de processus d'entreprise englobant tous les aspects de la production. Cela inclut la gestion de la demande, la planification des ressources, le contrôle de la production et la gestion des coûts. MRP II repose sur plusieurs bases de données dans ces quatre domaines.
- **ERP (Enterprise Resource Planning - 1990-2000) :** Cette méthodologie recentre la gestion interne sur l'entreprise dans son ensemble, spécifique à un secteur

d'activité et soutenue par les technologies de l'information. Elle se fonde sur la conceptualisation des activités de l'entreprise en termes de fonctionnalités intra-entreprise et de processus d'entreprise. Cela comprend les activités commerciales, financières, administratives, de ressources humaines ainsi que les activités industrielles de production. L'ERP repose sur une base de données unique qui soutient une approche de gestion des opérations basée sur des processus intégrés interentreprises et un accès illimité aux données opérationnelles.

- **ERP II (Extended Enterprise Resource Planning - à partir de 2000) :** Ce concept élargit la gestion des opérations aux partenariats internes et externes, dans un domaine d'activité spécifique, en tirant parti des technologies de l'information. Il repose sur la modélisation des activités de l'entreprise en termes de fonctionnalités intra et inter-organisationnelles. Les activités incluent les opérations commerciales, financières, administratives, industrielles, ainsi que la collaboration avec les partenaires commerciaux. ERP II repose sur l'intégration de la gestion des relations avec les consommateurs, de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, et de la gestion du cycle de vie des produits, ainsi que sur la communication internet avec les partenaires commerciaux. [18]

2.5 Types d'ERP

Caractéristique	**ERP sur site**	**ERP cloud**
Localisation du logiciel	Hébergé sur les serveurs et les postes de travail de l'entreprise	Hébergé sur des serveurs distants gérés par un fournisseur de services cloud
Contrôle et personnalisation	Contrôle total sur la personnalisation et l'adaptation aux besoins spécifiques	Options de personnalisation limitées par le fournisseur et les fonctionnalités prédéfinies
Coûts et évolutivité	Investissement initial important, mais coûts potentiellement plus bas sur le long terme	Frais d'abonnement mensuels et coûts d'utilisation variables, évolutivité simplifiée
Responsabilité de la maintenance et des mises à jour	Nécessite une expertise informatique interne pour la maintenance, les mises à jour et la sécurité	Maintenance, mises à jour et sécurité gérées par le fournisseur de services cloud
Accès et mobilité	Accès limité au réseau interne de l'entreprise	Accès depuis n'importe où avec une connexion internet, favorisant la mobilité et le travail à distance

Tableau 2.1 – Comparaison entre ERP sur site et ERP cloud [30] [37]

Avantages de l'ERP sur site :

- Contrôle total sur les données et la sécurité.
- Personnalisation et adaptation aux besoins spécifiques.

- Potentiel de coûts plus bas sur le long terme.

Inconvénients de l'ERP sur site :

- Investissement initial important.
- Nécessite une expertise informatique interne.
- Accès limité et mobilité réduite.
- Flexibilité d'accès et mobilité accrue.
- Coûts initiaux plus bas et évolutivité simplifiée.
- Maintenance et mises à jour simplifiées.

Inconvénients de l'ERP cloud :

- Moins de contrôle sur la personnalisation et la sécurité des données.
- Dépendance du fournisseur de services cloud.

En résumé, le choix entre un ERP sur site et un ERP cloud dépend des besoins et des priorités spécifiques de chaque entreprise.

Facteurs à prendre en compte pour la prise de décision :

- Taille et complexité de l'entreprise.
- Expertise informatique interne.
- Budget.
- Priorités stratégiques (contrôle, sécurité, personnalisation, flexibilité, etc.)

Une analyse approfondie de ces facteurs permettra aux entreprises de prendre une décision éclairée et de choisir l'ERP qui répondra le mieux à leurs besoins uniques.

De plus, concernant les systèmes ERP disponibles sur le marché les statistiques du rapport ERP de 2024 de Panorama Consulting Group indiquent le résultat suivant :

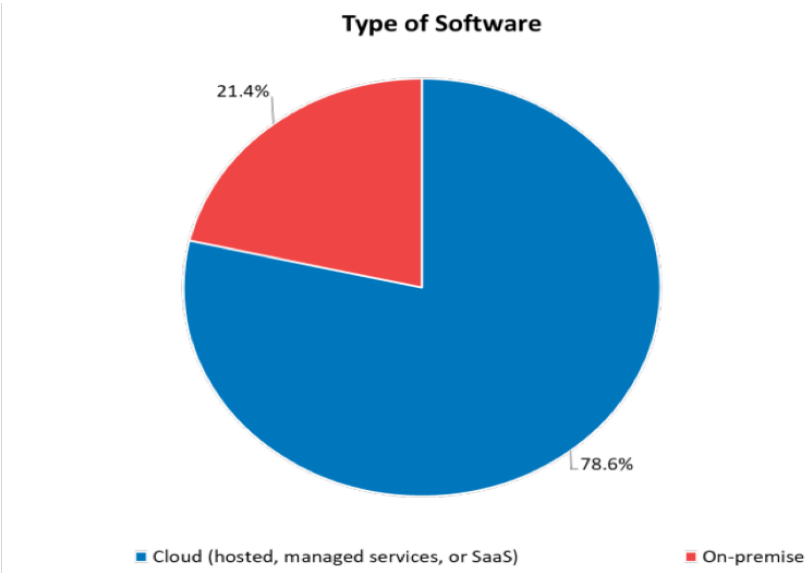


FIGURE 2.1 – Types d'ERP [37]

2.6 Cycle de vie d'un projet ERP

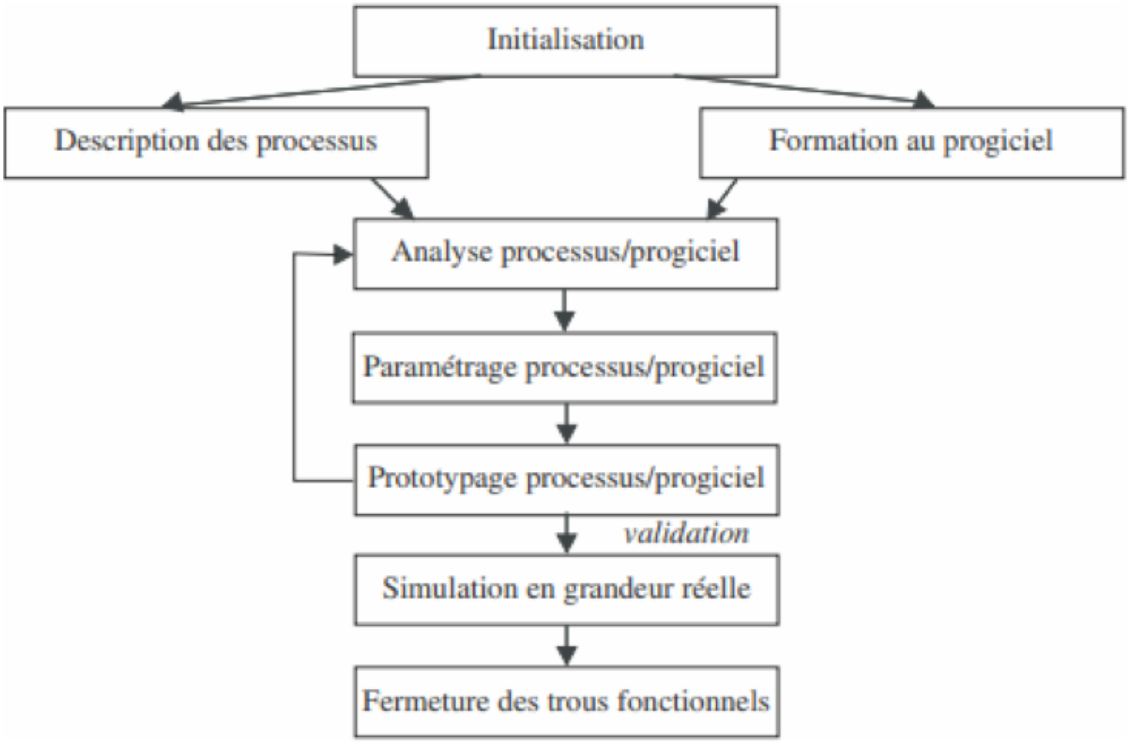


FIGURE 2.2 – Le Cycle ERP [15]

1. **Initialisation**
   Cette étape consiste à définir les objectifs du projet ERP et à identifier les ressources nécessaires à sa mise en œuvre. Il est également important de créer une équipe de projet et de nommer un chef de projet.
2. **Description des processus**
   Cette étape consiste à décrire en détail tous les processus de l'entreprise. Cela inclut l'identification des intrants, des extrants et des activités de chaque processus. La description des processus est essentielle pour identifier les besoins en matière de fonctionnalités ERP.
3. **Formation au progiciel**
   Cette étape consiste à former les utilisateurs du progiciel ERP. La formation doit couvrir toutes les fonctionnalités du progiciel et doit être adaptée aux besoins des utilisateurs.
4. **Analyse processus/progiciel**
   Cette étape consiste à comparer les processus de l'entreprise aux fonctionnalités du progiciel ERP. Il est important de déterminer si le progiciel peut répondre à tous les besoins de l'entreprise. Si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de modifier les processus de l'entreprise ou de personnaliser le progiciel.
5. **Paramétrage processus/progiciel**
   Cette étape consiste à configurer le progiciel ERP pour qu'il corresponde aux processus de l'entreprise. Cela implique de définir les paramètres du progiciel et de créer les données nécessaires.

6. **Prototypage processus/progiciel**
   Cette étape consiste à créer des prototypes des processus de l'entreprise dans le progiciel ERP. Les prototypes permettent de tester le progiciel et de s'assurer qu'il fonctionne comme prévu.
7. **Validation**
   Cette étape consiste à valider le progiciel ERP auprès des utilisateurs et du comité de pilotage du projet. La validation permet de s'assurer que le progiciel répond aux besoins de l'entreprise et qu'il est facile à utiliser.
8. **Simulation en grandeur réelle**
   Cette étape consiste à tester le progiciel ERP dans un environnement de production. La simulation en grandeur réelle permet de s'assurer que le progiciel peut gérer le volume réel des transactions de l'entreprise.
9. **Fermeture des trous fonctionnels**
   Cette étape consiste à corriger les problèmes rencontrés lors de la simulation en grandeur réelle. Cela peut impliquer de modifier le paramétrage du progiciel ou de développer des modules personnalisés.
10. **Déploiement**
    Cette étape consiste à déployer le progiciel ERP dans l'ensemble de l'entreprise. Le déploiement doit être planifié et exécuté méticuleusement pour minimiser les perturbations de l'activité.
11. **Support**
    Cette étape consiste à fournir un support aux utilisateurs du progiciel ERP. Le support doit inclure la documentation, la formation et la résolution des problèmes.
12. **Maintenance**
    Cette étape consiste à maintenir le progiciel ERP à jour et à le faire évoluer pour répondre aux besoins changeants de l'entreprise. La maintenance doit inclure des mises à jour logicielles, des correctifs de bogues et des personnalisations.

Le cycle de vie d'un projet ERP est un processus complexe et itératif. Il est important de bien planifier et de gérer le projet pour garantir sa réussite.

En plus des étapes décrites ci-dessus, il est important de noter que le cycle de vie d'un projet ERP peut également inclure une étape de pré-étude. Cette étape consiste à évaluer les besoins de l'entreprise et à déterminer si un progiciel ERP est la bonne solution.

2.7 Intégration des ERP

Les systèmes ERP (Enterprise Resource Planning) visent à optimiser l'ensemble des processus métiers d'une entreprise en les unifiant au sein d'une plateforme centralisée. Cette approche holistique permet de réduire les délais de mise sur le marché des produits et services, d'améliorer la collaboration interdépartementale et de prendre des décisions plus éclairées.

L'intégration offerte par les ERP s'étend au-delà de la simple gestion de la productivité. Elle englobe plusieurs aspects essentiels :

- **Normalisation des données :** Harmoniser les formats et les structures des données provenant de différentes sources assure une cohérence et une fiabilité accrues des informations. Cela facilite l'analyse, le partage et l'exploitation des données à travers l'entreprise.
- **Intégration de l'architecture applicative :** Connecter les différents systèmes d'information existants permet une communication fluide et une élimination des silos de données. Cela favorise une vision globale des opérations et une meilleure prise en charge des processus métier interdépartementaux.
- **Unification de l'interface utilisateur :** Offrir une interface ergonomique et homogène à tous les utilisateurs, quel que soit leur rôle ou leur localisation, simplifie l'interaction avec le système ERP et améliore l'expérience utilisateur. [29]

2.7.1 Modes d'intégration des ERP

- **Intégration centralisée :** Les données sont consolidées dans un référentiel central accessible à tous les services de l'entreprise. Cette approche offre une vue d'ensemble unifiée et facilite la gestion centralisée des processus.
- **Intégration locale :** Les données sont intégrées au niveau de plusieurs "tiers" logiques, chacun correspondant à un domaine fonctionnel spécifique. Cela permet une certaine autonomie et une adaptation aux besoins particuliers de chaque service.
- **Intégration au niveau utilisateur :** L'intégration se fait directement au niveau des postes de travail des utilisateurs, leur fournissant un accès direct aux données et aux fonctionnalités pertinentes pour leurs tâches quotidiennes.

2.7.2 Composants intégrés par les ERP :

Un système ERP complet intègre généralement les éléments suivants :

1. **La partie centrale du système d'information :** Elle comprend les mainframes et serveurs d'entreprise qui hébergent les données critiques et les applications essentielles.
2. **L'informatique répartie :** Elle englobe les serveurs départementaux qui gèrent les processus et les données spécifiques à chaque service ou domaine d'activité.
3. **Les logiciels de communication :** Divers logiciels assurent la communication entre les différentes composantes du système d'information, tels que les middlewares, les gestionnaires de réseau local et les gestionnaires de transactions.

2.8 Les modules ERP

Les systèmes de gestion intégrés ERP (Enterprise Resource Planning) sont conçus selon une architecture modulaire afin de répondre aux différents besoins fonctionnels des entreprises. Cette modularité permet une mise en œuvre progressive et ciblée des processus métiers à automatiser. Les modules ERP les plus répandus couvrent généralement les domaines suivants [65] [67] :

- **Le module financier** et comptable constitue le cœur de nombreux ERP. Il assure la gestion de la comptabilité générale, auxiliaire et analytique, tout en intégrant les processus de facturation, recouvrement, immobilisations, etc.

- **Le module des ressources humaines (RH)** permet la gestion administrative du personnel (paie, congés, formation) mais aussi la gestion prévisionnelle des emplois et des compétences.
- **Le module achat** est dédié aux processus d'approvisionnement, de la gestion des fournisseurs jusqu'au suivi des achats, en passant par les appels d'offres et les négociations tarifaires.
- **Le module ventes & distribution** couvre le cycle de vente complet, de la prise de commandes jusqu'à la livraison et la facturation des clients.
- **Le module de production/manufacture** assure la planification des besoins, l'ordonnancement et le pilotage des activités de fabrication ou d'assemblage.
- **Le module gestion des stocks et de la chaîne logistique** optimise les flux physiques dans l'entreprise et sa supply chain.

De nombreux autres modules peuvent s'ajouter pour couvrir des besoins spécifiques : gestion de projets, maintenance des équipements, qualité, etc.

Cette architecture modulaire permet aux entreprises de déployer progressivement leur ERP en démarrant par les processus stratégiques, puis d'étendre les fonctionnalités au fur et à mesure de leurs besoins d'intégration.

Figure 2.3 – Modules d'ERP Source : nextgestion.com

2.8.1 Achat

Dans le contexte actuel marqué par une concurrence accrue et des marges serrées, les entreprises cherchent constamment à optimiser leurs processus internes pour gagner en efficacité et en rentabilité.

La gestion des achats, représentant souvent une part importante des dépenses d'une entreprise, joue un rôle indispensable dans cet effort d'optimisation. C'est dans ce cadre que le module achat d'un ERP (Enterprise Resource Planning) s'impose comme un outil stratégique pour les entreprises qui souhaitent rationaliser et piloter efficacement leurs processus d'approvisionnement.

Le module d'achat est un outil essentiel permettant aux entreprises de s'approvisionner en produits, matières premières et services nécessaires à leur activité de fabrication ou de revente. Ce module automatise et centralise l'ensemble du processus d'achat, de la recherche de fournisseurs et l'envoi de demandes de devis jusqu'au suivi des commandes et des livraisons. Grâce à une base de données de fournisseurs approuvés et des fonctionnalités d'analyse poussées, le module permet d'optimiser les négociations, d'appliquer les meilleures pratiques d'achat, de renforcer les relations fournisseurs et finalement d'augmenter la rentabilité. Au-delà de la gestion opérationnelle des achats, cet outil offre également une vision globale et en temps réel de la Supply Chain, permettant d'anticiper les risques de rupture ou de sur-approvisionnement. L'analytique avancée, couplée à des outils de contrôle des coûts et de gestion des risques, identifie les leviers d'optimisation pour maximiser le pouvoir d'achat tout en maîtrisant les dépenses.

2.8.2 Production

Le module de fabrication permet aux entreprises manufacturières d'optimiser et de rationaliser leurs processus de production. Véritable pierre angulaire des systèmes ERP, ce module offre des fonctionnalités complètes de planification des besoins matières, d'ordonnancement de la production, de gestion de la qualité et de suivi de l'exécution. Il permet de s'assurer que le niveau de production reste constamment aligné sur la demande réelle, tout en maximisant l'utilisation des ressources disponibles. Grâce à des outils avancés de planification par processus ou par produits, les entreprises peuvent facilement mettre en place des modes de fabrication mixtes pour diversifier leur offre et répondre à différents types de commandes. Le module production apporte ainsi une visibilité en temps réel sur l'ensemble de la chaîne de valeur, du calcul des besoins en composants jusqu'au pilotage fin des opérations d'assemblage et de contrôle qualité. Il permet de planifier de manière optimale la maintenance des équipements pour éviter les arrêts intempestifs, de suivre les coûts de revient et les délais de production afin de continuellement gagner en productivité.

2.8.3 WMS

Le module Gestion d'Entrepôts ou WMS (Warehouse Management System) fait partie intégrante de la suite logiciel ERP. Son rôle est d'assurer le contrôle et l'optimisation des mouvements et du stockage des produits au sein des entrepôts de l'entreprise.

Ce module WMS pilote l'ensemble des activités logistiques internes, depuis la réception des livraisons fournisseurs jusqu'à la préparation et l'expédition des commandes clients,

en passant par le stockage et le rangement efficient des articles.

Interfacé avec le module de gestion des stocks de l'ERP, le WMS utilise une base de données centralisée pour tracer en temps réel toutes les transactions et maintenir un inventaire précis des niveaux de stocks disponibles dans les entrepôts.

Il s'appuie sur des technologies de saisie mobile automatique telles que les codes-barres, les terminaux sans fil et potentiellement la RFID. Cela permet une capture efficace des données de mouvements qui sont instantanément transmises et mises à jour dans le système d'information central.

Grâce aux données en temps réel sur l'occupation des emplacements, le module WMS optimise le rangement des articles pour fluidifier les opérations de préparation des expéditions. Il génère également des indicateurs clés de performance et des rapports détaillés permettant de piloter l'activité logistique et la gestion des stocks en entrepôt.

En parfaite intégration avec les autres modules tels que la gestion des achats, de la production et de la distribution, le WMS constitue ainsi un maillon essentiel pour assurer une visibilité et une traçabilité globale sur les flux physiques de l'entreprise.

2.8.4 Transport

Le module gestion des transports fait partie intégrante de la suite logicielle ERP dédiée à la gestion de la supply chain. Ce module spécialisé permet aux entreprises de planifier, exécuter et optimiser l'ensemble des mouvements physiques de marchandises, que ce soit pour les flux entrants d'approvisionnement ou les flux sortants de livraison aux clients.

Interfacé en temps réel avec les autres modules clés comme la gestion des commandes, des stocks et des expéditions, le module gestion des transports apporte une visibilité complète sur les opérations de transport au quotidien. Il assure le suivi des expéditions sur les différents modes (routier, aérien, maritime) et la traçabilité du fret aussi bien au niveau local qu'international. Le module gère également la documentation réglementaire associée au transport, garantissant ainsi la conformité des opérations.

Au-delà du simple suivi, l'un des principaux atouts du module gestion des transports réside dans ses capacités d'optimisation des plans de transport. Il permet en effet de consolider intelligemment les chargements en tenant compte de multiples contraintes (délais, coûts, émissions CO2, etc.) et de calculer les itinéraires de livraison les plus efficients.

Le module gestion des transports intégré apporte également un haut niveau d'automatisation en rationalisant les processus de bout-en-bout, depuis la saisie initiale des commandes jusqu'à la facturation finale des frais de transport, en passant par la génération automatique des documents d'accompagnement.

Dans une optique d'amélioration continue de la performance logistique, les données du module gestion des transports alimentent les tableaux de bord de pilotage permettant d'analyser les indicateurs clés et d'identifier les axes d'optimisation.

2.9 Impacts des ERP sur l'économie, l'organisation et sur la chaine logistique

2.9.1 Sur l'économie

Les entreprises investissent massivement dans les ERP (Progiciels de Gestion Intégrés) en raison des retours économiques attendus. Premièrement, ces systèmes éliminent et automatisent de nombreuses tâches routinières, ce qui permet aux collaborateurs de se concentrer sur des activités à plus forte valeur ajoutée. La baisse des coûts technologiques permet ainsi d'augmenter la productivité avec les mêmes ressources. Deuxièmement, selon la théorie des coûts de transaction, les ERP permettent d'accéder rapidement et à moindre coût à une vaste quantité d'informations, diminuant significativement les coûts liés aux relations avec les fournisseurs. Cela encourage l'externalisation des activités à faible valeur ajoutée, réduisant la taille et les coûts internes. Enfin, en facilitant la coordination et la surveillance des employés, ces progiciels permettent, selon la théorie de l'agence, de gérer un plus grand nombre de collaborateurs avec moins de managers, réduisant ainsi les coûts de management. [52]

2.9.2 Sur l'organisation

Au-delà des avantages économiques, les ERP apportent également des bénéfices organisationnels soutenant la stratégie des entreprises. Leur impact majeur réside dans l'horizontalisation de la hiérarchie qu'ils favorisent. Les grandes structures bureaucratiques, souvent peu réactives et moins compétitives, peuvent devenir plus efficientes grâce à ces outils. Ceux-ci cassent les silos verticaux en donnant un accès transversal aux données, permettant aux managers de superviser plus d'employés. Ces derniers peuvent également prendre des décisions de manière autonome grâce à l'accès direct aux informations nécessaires.

Ce gain d'autonomie et de flexibilité pour les équipes constitue le second apport clé. La disponibilité des données stratégiques en temps réel libère les équipes des contraintes géographiques. Elles peuvent ainsi fonctionner de manière décentralisée en mode projet, tout en restant coordonnées via le système intégré. Cette agilité stimule la créativité, encourage l'innovation au sein des équipes autonomes, et réduit les coûts managériaux et infrastructurels.

Finalement, l'ERP transforme l'organisation vers un modèle plus horizontal, flexible et innovant. Ce mode agile permet à l'entreprise de s'adapter efficacement aux évolutions tout en maîtrisant ses dépenses, soutenant ainsi sa stratégie globale. [52]

2.9.3 Sur la chaine logistique

Les ERP améliorent significativement la performance de la chaîne d'approvisionnement en automatisant les processus opérationnels clés. Cette automatisation élimine la nécessité de saisir manuellement des données dans plusieurs systèmes, réduisant ainsi les erreurs et économisant du temps. Par exemple, l'ERP peut automatiser des processus tels que la saisie des commandes, la gestion des stocks et les achats, ce qui rationalise les opérations sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Cela permet non seulement

de gagner en efficacité, mais aussi d'assurer une plus grande précision et rapidité dans les transactions quotidiennes.

Les solutions ERP offrent une visibilité des données en temps réel à travers l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Cette transparence permet un meilleur suivi des niveaux de stocks, des états des commandes et des délais de livraison, conduisant ainsi à une prise de décision plus éclairée et à une efficacité opérationnelle accrue. Les capacités de rapport en temps réel aident également à identifier rapidement les problèmes, permettant ainsi des actions correctives immédiates. Cela se traduit par une amélioration générale de la gestion et de la réactivité de la chaîne d'approvisionnement.

Grâce à la standardisation des processus, les systèmes ERP assurent la cohérence et l'efficacité des différentes fonctions de la chaîne d'approvisionnement. Cette standardisation accélère les opérations, réduit la variabilité des processus et garantit que les tâches sont exécutées correctement et efficacement. De plus, les alertes et notifications intégrées aux systèmes ERP aident les gestionnaires à traiter de manière proactive les exceptions ou les problèmes potentiels, évitant ainsi des retards coûteux et des erreurs.

Une meilleure collaboration entre les différents départements d'une organisation ainsi qu'avec les partenaires externes, les fournisseurs et les clients est facilitée par les ERP. Cette collaboration est indispensable pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement car elle assure que tous les intervenants sont alignés, ce qui conduit à des opérations plus synchronisées et efficaces. La capacité des ERP à intégrer et à partager des informations de manière fluide améliore la coordination et la communication, réduisant ainsi les inefficacités et les malentendus.

La réduction des coûts est un autre avantage clé des solutions ERP, qui rationalisent les flux de travail et suppriment les goulets d'étranglement. Cette efficacité permet aux employés d'accomplir leurs tâches en moins de temps, réduisant ainsi les coûts de main-d'œuvre. De plus, les systèmes ERP intégrés minimisent le besoin de multiples applications autonomes, ce qui réduit encore les dépenses informatiques et opérationnelles. En centralisant les fonctions critiques dans un seul système, les entreprises peuvent réaliser des économies d'échelle et optimiser leurs ressources.

Enfin, les systèmes ERP modernes soutiennent les opérations multisites et mondiales, facilitant ainsi la gestion des chaînes d'approvisionnement à travers différents emplacements et pays. Ces systèmes peuvent gérer plusieurs langues, devises et exigences réglementaires, facilitant des opérations harmonieuses et le partage d'informations à l'échelle mondiale. Cette capacité permet aux entreprises de maintenir une cohérence dans leurs processus tout en s'adaptant aux spécificités locales, ce qui est essentiel pour les entreprises opérant à l'international. La consolidation des informations provenant de différents sites aide également à une gestion plus efficace et à une meilleure prise de décision.[1]

2.10 Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les ERP, en commençant par une présentation des systèmes d'information et leur évolution. Nous avons défini les ERP et examiné leurs différents types, cycles de vie, modes d'intégration, et composants. Les modules spécifiques, tels que l'achat, la production, la gestion d'entrepôt et le transport, ont été analysés pour montrer leur contribution à la chaîne de valeur de l'entreprise. Enfin, nous avons discuté des impacts des ERP sur l'économie, l'organisation des entreprises et la chaîne logistique, soulignant les avantages stratégiques et opérationnels qu'ils apportent.

Chapitre 3

Outils Et Concepts

3.1 Introduction

La recherche opérationnelle (RO) est une discipline scientifique pluridisciplinaire qui puise ses racines dans l'histoire. Bien qu'elle soit souvent perçue comme une approche récente, remontant à la Seconde Guerre mondiale avec son application aux opérations militaires, ses origines remontent en réalité bien plus loin dans le temps. Dès le XVIIe siècle, les pionniers tels que Blaise Pascal, Pierre de Fermat et Jacques Bernoulli posaient les bases des concepts fondamentaux de la décision dans l'incertain et de l'espérance mathématique. Au fil des siècles, d'autres pionniers comme Gaspard Monge, Augustin Cournot, Emile Borel, Erlang, Leonid Kantorovitch et Dénes König ont contribué à l'émergence de domaines clés tels que la théorie des graphes, la programmation linéaire et la théorie des files d'attente. [16]

La RO moderne est une discipline interdisciplinaire qui associe l'informatique, les mathématiques appliquées, la statistique, la gestion et le génie industriel. Son objectif principal est de fournir une base rationnelle à la prise de décision optimale, généralement dans le but d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts ou d'optimiser l'utilisation des ressources. En s'appuyant sur des approches algorithmiques et des modèles mathématiques, la RO permet de représenter et de résoudre des problèmes complexes rencontrés dans divers domaines tels que l'industrie, la logistique, la finance, la santé, les transports et les télécommunications.

La recherche opérationnelle a un impact significatif sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans les entreprises. Elle permet d'optimiser les opérations liées à la gestion des stocks, la planification de la production, le transport et la distribution, tout en intégrant des critères de durabilité. Grâce à la RO, les entreprises peuvent réduire leurs coûts, améliorer leur efficacité opérationnelle, augmenter la satisfaction client et diminuer leur impact environnemental. Elle fournit des outils et des analyses pour une prise de décision éclairée, permettant ainsi une meilleure réactivité face aux changements du marché. [31]

Bien que les concepts théoriques de la RO soient anciens, son développement pratique a été longtemps freiné par plusieurs facteurs, notamment la réticence initiale des économistes à adopter les modèles mathématiques, la complexité croissante des problèmes économiques et l'absence de puissance de calcul suffisante. Ce n'est qu'à partir des années 1950, avec l'avènement des premiers ordinateurs commerciaux, que la RO a pu réellement prendre son essor et s'imposer comme un outil indispensable à l'aide à la décision dans de nombreux secteurs d'activité.

3.2 Partie 01 : Théorie des graphes

3.2.1 Définitions de Base sur la théorie des graphes :

Graphe : Un graphe G est défini par un ensemble de sommets V et un ensemble d'arêtes E reliant certaines paires de sommets.

- $G = (V, E)$

Sommet (ou nœud) : Un point de connexion dans le graphe.

Arête : Une connexion entre deux sommets.

- **Arête orientée** (dans un digraphe ou graphe orienté) : Une connexion avec une direction.
- **Arête non orientée :** Une connexion sans direction particulière.

Successeur : Dans un graphe orienté, un successeur d'un sommet u est un sommet v tel qu'il existe une arête orientée allant de u vers v Autrement dit, v est directement accessible depuis u. [9]

Prédécesseur : Dans un graphe orienté, un prédécesseur d'un sommet v est un sommet u tel qu'il existe une arête orientée allant de u vers v Autrement dit, u a une connexion directe menant à v. [9]

Voisin : Dans un graphe non orienté, deux sommets sont voisins s'ils sont connectés directement par une arête. Dans un graphe orienté, le terme peut également être utilisé pour désigner des sommets connectés par une arête, indépendamment de la direction de celle-ci. [9]

Relation d'incidence : Dans un graphe, une relation d'incidence décrit la relation entre un sommet et une arête [9].

- **Incidence dans un graphe non orienté :**Une arête e est incidente à un sommet v si v est l'un des sommets extrémités de e Par exemple, si $e = (u, v)$ est une arête connectant les sommets u et v alors e est incidente à u et à v.
- **Incidence dans un graphe orienté :** Une arête orientée e allant de u à v (notée (u, v)) est incidente à u et à v. Plus spécifiquement, u est le sommet initial et v est le sommet terminal de l'arête e.

Relation d'adjacence : La relation d'adjacence décrit si deux sommets sont directement connectés par une arête [9].

- **Adjacence dans un graphe non orienté :** Deux sommets u et v sont adjacents s'ils sont reliés par une arête. Autrement dit, il existe une arête $e = (u, v)$ qui connecte u et v.
- **Adjacence dans un graphe orienté :** Un sommet u est adjacent à un sommet v s'il existe une arête orientée (u, v). Ici, la direction de l'arête est importante.

Degré d'un sommet : Le degré d'un sommet est une mesure du nombre de connexions (arêtes) qu'un sommet a avec d'autres sommets [9].

- **Degré dans un graphe non orienté :** Le degré d'un sommet v noté $deg(v)$, est le nombre d'arêtes incidentes à v.
- **Degré entrant et degré sortant dans un graphe orienté :**
  - **Degré entrant** $deg-(v)$ **:** Le nombre d'arêtes orientées entrant dans le sommet v.
  - **Degré sortant** $deg+(v)$ **:** Le nombre d'arêtes orientées sortant du sommet v.

Chemin : Une séquence de sommets où chaque sommet est connecté au suivant par une arête. [9]

Cycle : Un chemin qui commence et se termine au même sommet, sans répéter d'arêtes ou de sommets (sauf le point de départ/arrivée). [9]

3.2.2 Types de Graphes

1. **Graphe simple :** : Un graphe sans boucles (arêtes reliant un sommet à lui-même) ni arêtes multiples entre les mêmes sommets.
2. **Graphe orienté (ou digraphe) :** Un graphe où les arêtes ont une direction.
3. **Graphe pondéré :** Un graphe où les arêtes ont des poids ou des coûts associés.
4. **Graphe complet :** Un graphe où chaque paire de sommets est connectée par une arête unique.
5. **Graphe biparti :** Un graphe dont les sommets peuvent être divisés en deux ensembles disjoints tels que toutes les arêtes connectent un sommet de l'un à un sommet de l'autre.
6. **Graphe connexe :** Un graphe où il existe un chemin entre chaque paire de sommets. Dans un graphe orienté, un graphe est fortement connexe si chaque sommet est accessible depuis n'importe quel autre sommet.

3.2.3 Algorithme kruskal

L'algorithme de Kruskal est une méthode efficace pour trouver l'arbre couvrant de poids minimal dans un graphe pondéré et non orienté. Un arbre couvrant est un sous-ensemble d'arêtes qui relie tous les sommets du graphe sans former de cycle. Parmi tous les arbres couvrants possibles, l'arbre couvrant minimal est celui dont la somme des poids des arêtes est la plus petite. Cet algorithme est particulièrement utile dans de nombreux domaines tels que la conception de réseaux, la planification de routes et le clustering de données.

3.2.3.1 les étapes :

L'algorithme de Kruskal fonctionne de manière gloutonne en sélectionnant les arêtes les moins coûteuses en premier et en évitant la formation de cycles. Voici les étapes détaillées de son fonctionnement :

1. **Initialisation :**
   - Créez un ensemble vide A pour contenir les arêtes de l'arbre couvrant minimal.
   - Triez toutes les arêtes du graphe par ordre croissant de poids.
2. **Traitement des arêtes :**
   - Parcourez les arêtes triées par poids croissant.
   - Pour chaque arête (u, v) :
     - Si u et v ne sont pas dans le même composant (c'est-à-dire que leur inclusion ne formera pas de cycle), ajoutez l'arête à A.
     - Utilisez une structure de données Union-Find pour gérer les composants connectés et vérifier l'absence de cycles.

3. **Terminaison :**
   - Répétez l'étape 2 jusqu'à ce que A contienne $n-1$ arêtes, où n est le nombre de sommets dans le graphe.

3.2.3.2 Résultat :

À la fin de l'exécution de l'algorithme, l'ensemble A contient les arêtes de l'arbre couvrant minimal. Cet ensemble connecte tous les sommets du graphe avec un coût total minimum et sans former de cycles.
[17] [13]

Algorithm 1 L'algorithme de Kruskal

$F \leftarrow E$
$A \leftarrow \emptyset$
while $|A| < n-1$ **do**
  find $e \in F$ such that $v(e)$ is minimum
  $F \leftarrow F \setminus \{e\}$
  if $G(A \cup \{e\})$ *is acyclic* **then**
  end
  $A \leftarrow A \cup \{e\}$
end
$G(A)$ is a minimum spanning tree.

3.3 Partie 02 : Programmation Mathématique

3.3.1 L'optimisation mathématique :

L'optimisation est un domaine des mathématiques visant à modéliser, analyser et résoudre de manière analytique ou numérique un problème appelé problème d'optimisation. Ce type de problème consiste à identifier la ou les solutions qui maximisent ou minimisent une fonction objective, tout en respectant un ensemble de contraintes. L'optimisation est largement utilisée dans divers champs à l'intersection des mathématiques, de l'informatique et de l'économie. Elle trouve notamment des applications dans la recherche opérationnelle, l'analyse numérique, les statistiques, la théorie des jeux, ainsi que la théorie du contrôle et de la commande. De nos jours, l'optimisation est employée par de nombreux chercheurs et industriels pour résoudre tout système pouvant être décrit par un modèle mathématique. La qualité des résultats dépend de la pertinence du modèle représentant le système étudié, de l'efficacité des approches algorithmiques développées pour la résolution, et des moyens de traitement numérique disponibles. [36]

3.3.2 L'optimisation Combinatoire

L'optimisation combinatoire est une branche des mathématiques dédiée à la recherche de la meilleure solution possible parmi un ensemble fini mais souvent très grand de solutions admissibles. Elle vise à maximiser ou minimiser une fonction objectif définie sur des variables discrètes, typiquement des nombres entiers.

Résoudre un tel problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver la valeur optimale de la fonction objectif en explorant l'espace des solutions réalisables. Cependant, en raison de la complexité croissante de nombreux problèmes, atteindre l'optimum global peut s'avérer extrêmement difficile voire impossible en un temps raisonnable.

Dans ces cas, l'objectif devient alors de déterminer une solution approchée de bonne qualité, aussi proche que possible de l'optimum, mais calculable dans des délais acceptables. Les méthodes d'optimisation combinatoire visent à développer des algorithmes efficaces permettant d'obtenir de telles solutions quasi-optimales en un temps pratique, en exploitant au mieux la structure particulière du problème traité. [6]

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés selon le nombre de critères à optimiser :

- **Problèmes mono-objectifs :[28]** Une solution est associée à une seule valeur, se concentrant sur l'optimisation d'un seul critère. Par exemple pour le cas d'un problème minimisation s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{array}{ll} \text{Min}_x & f(x), \\ \text{Tel que,} & \begin{cases} g_i(x) \leq 0, & i = 1, \ldots, m, \\ h_j(x) = 0, & j = 1, \ldots, p, \\ x \in S \subseteq \mathbb{R}^n \end{cases} \end{array}$$

- **Problèmes multi-objectifs :[28]** Une solution est associée à plusieurs valeurs, impliquant l'optimisation simultanée de plusieurs critères souvent conflictuels. Cette catégorie modélise des problèmes réels complexes où la solution optimale recherchée est un ensemble de compromis satisfaisant toutes les contraintes. D'un point de vue mathématique, un problème d'optimisation multi-objectif, se présente, dans le cas où le vecteur $\vec{f}$ regroupe **k** fonctions objectif, de la façon suivante :

$$\begin{array}{ll} \text{Min}_x & \vec{f}(x), \\ \text{Tel que,} & \begin{cases} \vec{g}_i(x) \leq 0, & i = 1, \ldots, m, \\ \vec{h}_j(x) = 0, & j = 1, \ldots, p, \\ x \in S \subseteq \mathbb{R}^n \end{cases} \end{array}$$

3.3.3 Complexité des Algorithmes :

Lors de la résolution d'un problème, plusieurs algorithmes peuvent généralement être envisagés. C'est pourquoi, dans le cadre de la recherche opérationnelle, il est primordial de pouvoir comparer l'efficacité des différentes approches algorithmiques applicables. Deux critères principaux sont typiquement pris en compte par le chercheur opérationnel dans cette évaluation : le temps de calcul requis et l'espace mémoire nécessaire à l'exécution de l'algorithme. Bien que l'espace mémoire reste un facteur important, dans la grande majorité des cas, c'est le temps de calcul qui devient le paramètre clé pour mesurer l'efficacité d'un algorithme. Que le problème doive être traité en temps réel ou que le chercheur dispose de quelques heures seulement, la contrainte temporelle est toujours présente.

La théorie de la complexité fournit des outils permettant d'étudier la difficulté de résolution des problèmes mathématiques en termes de ressources spatiales et temporelles requises. Cette complexité est évaluée par ordre de grandeur et considère le cas le plus

défavorable, estimant ainsi la complexité du pire cas possible. Les avancées théoriques dans ce domaine ont conduit à une classification des problèmes de décision selon la complexité de leur résolution. [16]

3.3.4 Complexité des Problèmes

Après avoir évalué les performances d'un algorithme spécifique, le chercheur opérationnel doit se demander si cet algorithme proposé est le plus efficace possible pour résoudre le problème traité. Par "plus efficace possible", on entend qu'il a une complexité inférieure à celle de tout autre algorithme susceptible de résoudre le même problème. La théorie de la complexité des problèmes vise à répondre à cette interrogation en déterminant, si possible, la complexité minimale d'un algorithme capable de résoudre un problème donné.

La théorie de la complexité étudie formellement la difficulté des problèmes en informatique. Elle vise à identifier, parmi différents algorithmes réalisant la même tâche, lequel est le plus performant. Pour comparer les algorithmes, au lieu d'évaluer leur temps d'exécution sur une machine spécifique (ce qui dépendrait du matériel et du langage utilisés), une approche indépendante du matériel est nécessaire. Les mathématiques deviennent alors un outil clé pour analyser rigoureusement les algorithmes, en calculant une mesure de leur complexité, c'est-à-dire le nombre d'opérations élémentaires requises pour fournir la solution. [16]

3.3.4.1 Classe P

La classe P regroupe les problèmes de décision qui peuvent être résolus par un algorithme déterministe en un temps polynomial. Ces algorithmes suivent un ensemble d'instructions prédéfinies et produisent toujours le même résultat pour une même entrée, avec un nombre d'opérations proportionnel à une puissance de la taille de l'entrée.[16]

3.3.4.2 Classe NP

La classe NP regroupe les problèmes de décision pour lesquels il existe un algorithme non déterministe qui peut vérifier une solution en un temps polynomial. Ces algorithmes hypothétiques explorent différentes solutions possibles en parallèle et vérifient si une solution satisfait effectivement la contrainte du problème. [16]

3.3.4.3 Problèmes NP-complets :

Un problème est dit NP-complet s'il fait partie de la classe NP et si tout autre problème NP peut se ramener à lui en un temps polynomial. Cela signifie que la résolution en temps polynomial d'un problème NP-complet permettrait de résoudre de manière tout aussi efficace tous les autres problèmes NP. [16]

3.3.4.4 Problèmes d'optimisation NP-difficiles

Les problèmes d'optimisation NP-difficiles cherchent une solution optimale pour une situation donnée, en minimisant ou maximisant un critère spécifique. Un problème d'optimisation est considéré NP-difficile lorsqu'il est associé à un problème de décision NP-complet, ce qui signifie qu'il est au moins aussi complexe que tout autre problème dans

la classe NP. La résolution exacte de ces problèmes n'est généralement applicable qu'à de petites instances en raison de leur complexité élevée. [16]

3.3.5 Méthodes de résolution

En recherche opérationnelle, il existe de nombreuses approches analytiques pour améliorer la résolution de problèmes complexes. Ces approches peuvent être classées en deux grandes familles : les méthodes exactes qui garantissent une solution optimale en un temps fini, mais qui peuvent être très coûteuses en termes de temps de calcul ; et les méthodes approximatives qui offrent des solutions de qualité satisfaisante dans un délai raisonnable et à moindre coût, mais qui ne garantissent pas l'optimalité de la solution.

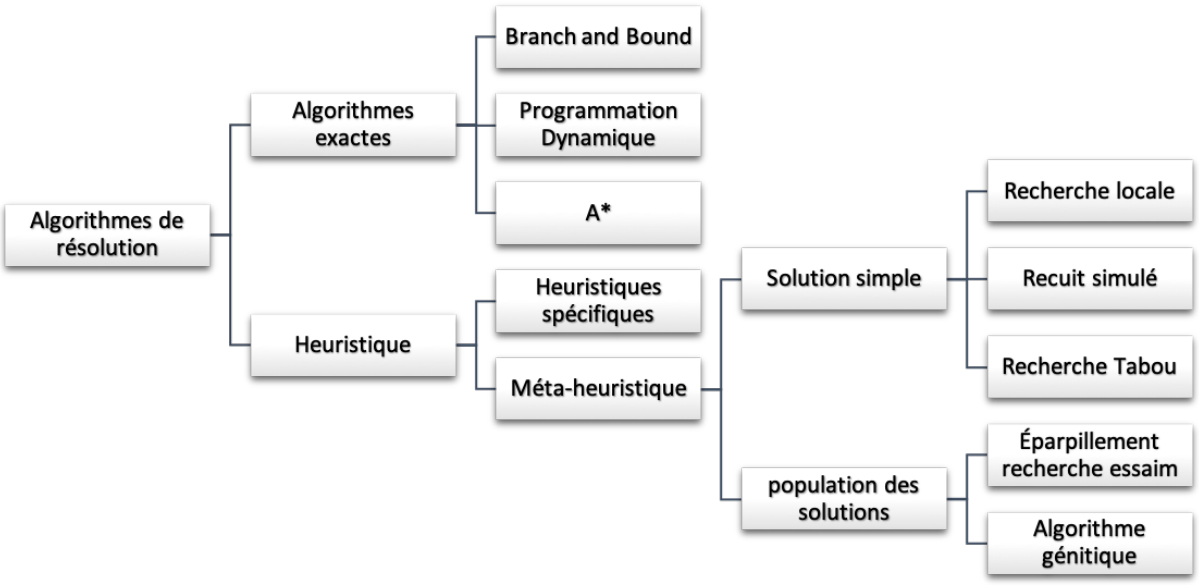


FIGURE 3.1 – Classification des méthodes d'optimisation [20]

3.3.5.1 Méthodes exactes

Lorsqu'on cherche à obtenir une solution optimale à un problème d'optimisation combinatoire, on s'intéresse aux méthodes de résolution exactes. Ces méthodes reposent sur plusieurs principes fondamentaux :

- La procédure de séparation et d'évaluation (Branch and Bound)
- La programmation dynamique
- La programmation linéaire en nombres entiers ou mixtes

Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux problèmes de petite ou moyenne taille, car elles deviennent rapidement très coûteuses en temps de calcul pour les problèmes de grande taille, qui sont souvent des problèmes NP-difficiles.

Le concept clé de ces méthodes est l'exploration implicite de l'espace de recherche. Au lieu d'énumérer toutes les solutions possibles, ce qui serait intraitable, elles exploitent des propriétés intrinsèques et des relations de dominance entre les solutions pour élaguer certaines parties de l'espace. Cela permet de réduire considérablement le nombre de solutions à visiter et donc le temps de calcul.
Parmi ces méthodes exactes, la famille des algorithmes de séparation et évaluation (Branch and Bound) occupe une place prépondérante. Leur principe est de décomposer récursivement le problème initial en sous-problèmes, formant ainsi un arbre de recherche. La procédure repose sur quatre étapes clés : la construction d'une solution heuristique initiale, l'évaluation de cette solution, la séparation en sous-problèmes, et l'exploration de l'arbre ainsi généré.

D'autres méthodes exactes classiques incluent la programmation dynamique, qui résout des sous-problèmes pour reconstruire la solution optimale globale, et les méthodes de programmation linéaire en nombres entiers ou mixtes (Branch and Cut), dérivées du Branch and Bound.
L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent d'obtenir une solution optimale prouvée pour le problème traité. Cependant, leur inconvénient majeur est leur temps de calcul souvent prohibitif dès que la taille de l'instance augmente, en raison de l'explosion combinatoire inhérente aux problèmes d'optimisation. Leur efficacité n'est donc réellement satisfaisante que pour les instances de petite taille. C'est pourquoi, en pratique, on leur préfère souvent des méthodes approchées ou des heuristiques pour résoudre les problèmes de grande taille. [8] [22]

3.3.5.2 Méthodes approchées

Lorsque les méthodes de résolution exactes échouent à résoudre des problèmes d'optimisation de grande taille, on se tourne vers des approches alternatives, dites approchées ou approximatives. Celles-ci visent à obtenir rapidement des solutions de bonne qualité, sans nécessairement garantir l'optimalité. Elles se répartissent principalement en deux familles : les heuristiques et les métaheuristiques.

Les heuristiques

Les heuristiques sont des algorithmes d'optimisation conçus pour résoudre des problèmes NP-difficiles en fournissant des solutions réalisables, mais pas nécessairement optimales, dans un délai raisonnable. Elles sont adaptables à une large variété de problèmes, offrant une approche flexible pour les défis d'optimisation. Voici les types d'heuristiques les plus couramment utilisées et leurs caractéristiques distinctives :

- **Heuristiques de Construction :**
  Les méthodes constructives suivent un principe où une solution est construite à partir de zéro en ajoutant itérativement des composants à une sous-solution existante. Elles sont souvent utilisées pour générer des solutions initiales ou intégrées dans d'autres procédures d'optimisation. Ces heuristiques se caractérisent par leur facilité de mise en œuvre et leur rapidité d'exécution, mais sont cependant souvent critiquées pour la qualité variable des solutions produites. Parmi les exemples

de méthodes constructives, on peut citer les algorithmes gloutons, la méthode des gains de Clarke et Wright, et la méthode d'insertion.

- **Exemple : Méthode des Gains de Clarke et Wright :**Cette méthode, introduite pour le problème de tournées de véhicules (VRP), commence par une solution triviale où chaque client est desservi par une tournée distincte. Les tournées sont ensuite fusionnées deux par deux en fonction des gains calculés, triés par ordre décroissant, et les fusions sont réalisées si elles respectent les contraintes du problème (capacités, sous-tours, etc.). L'algorithme s'arrête lorsque plus aucune fusion améliorante n'est possible.

- **Heuristiques à Deux Phases :**
  Ces méthodes se déroulent en deux étapes. D'abord, elles génèrent une ou plusieurs solutions initiales. Ensuite, elles appliquent une procédure d'amélioration pour affiner ces solutions.
  Types :
  - **Heuristiques "Cluster-First, Route-Second" :** : Les clients sont d'abord regroupés en clusters, chaque groupe étant assigné à un véhicule. Un problème de voyageur de commerce (TSP) est ensuite résolu pour chaque groupe.

  - **Heuristiques "Route-First, Cluster-Second" :** : Les clients sont d'abord regroupés en clusters, chaque groupe étant assigné à un véhicule. Un problème de voyageur de commerce (TSP) est ensuite résolu pour chaque groupe.
- **Heuristiques d'Amélioration :** Les méthodes d'amélioration nécessitent une solution initiale qu'elles améliorent progressivement à mesure que l'algorithme progresse. Elles peuvent être utilisées pour améliorer les solutions générées par d'autres heuristiques constructives. Ces méthodes se caractérisent par leur efficacité à affiner les solutions, souvent via des techniques de recherche locale

Les heuristiques sont particulièrement utiles pour les problèmes où les solutions exactes sont impraticables à obtenir en raison de la complexité computationnelle. Leur flexibilité les rend adaptées à une variété de domaines, notamment la recherche opérationnelle, l'ingénierie et l'intelligence artificielle. Bien qu'elles ne garantissent pas toujours une solution optimale, elles offrent souvent des solutions de qualité acceptable dans des délais raisonnables, constituant ainsi une approche essentielle pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. [6] [8]

Les métaheuristiques

Les métaheuristiques représentent une classe de méthodes d'optimisation conçues pour fournir des solutions de qualité à des problèmes combinatoires complexes, souvent NP-difficiles, en des temps raisonnables. Le terme "métaheuristique" provient du grec "meta" signifiant "au-delà", ce qui reflète leur capacité à surmonter les minima locaux et à rechercher des solutions globales optimales.

Les métaheuristiques sont des algorithmes stochastiques itératifs qui avancent vers un optimum global en évaluant une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes d'apprentissage, essayant de comprendre les caractéristiques d'un problème pour en trouver une approximation de la meilleure solution, similaire aux algorithmes

d'approximation. Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux capacités de calcul modernes, permettant le développement de métaheuristiques de plus en plus sophistiquées et efficaces pour résoudre des problèmes NP-difficiles.

Les métaheuristiques peuvent être classées en deux grandes catégories : celles qui visent un minimum local et celles qui recherchent un optimum global. [8]

- **Méthodes de Recherche Locale :** Les méthodes de recherche locale, ou méthodes par voisinages, commencent par une solution initiale et améliorent successivement cette solution jusqu'à ce qu'aucune amélioration supplémentaire ne soit possible ou qu'un nombre maximal d'itérations soit atteint. Bien que ces méthodes ne garantissent pas l'optimalité, elles sont souvent efficaces pour trouver des solutions de bonne qualité en un temps raisonnable.

Algorithm 2 Algorithme de recherche locale

Générer une solution initiale S_0
Initialiser $S \leftarrow S_0$
Initialiser $S^* \leftarrow S_0$
repeat
  Solution courante
  Générer un voisinage $V(S)$
  Sélectionner le meilleur voisin $S' \in V(S)$ tel que $f(S') < f(S)$
  if $f(S') < f(S)$ **then**
    Mettre $S \leftarrow S'$
    if $f(S') < f(S^*)$ **then**
      Mettre $S^* \leftarrow S'$
    end
  end
  Critère d'arrêt satisfait
until;
Critère d'arrêt satisfait
Renvoyer S^*

- **Méthode de Recuit Simulé** La Méthode de Recuit Simulé tire son inspiration du processus de recuit utilisé en métallurgie. Ce dernier consiste en une suite de cycles de refroidissement lent dans le but d'obtenir un matériau homogène et de très haute qualité. Il alterne des phases de refroidissement progressif et de réchauffage (recuit) visant à minimiser l'énergie du matériau. Cette méthode repose sur l'algorithme de Metropolis qui permet de décrire l'évolution d'un système thermodynamique. [2]

Algorithm 3 Pseudo-code du recuit simulé [8]

Générer S_0, T_0
Initialiser $S^* \leftarrow S_0$
repeat
  Solution courante
  Générer un voisinage $V(S)$ et Sélectionner aléatoirement un voisin $S' \in V(S)$
  Calculer $\Delta E = f(S') - f(S)$
  if $\Delta E \leq 0$ **then**
    Mettre $S \leftarrow S'$ **if** $f(S') \leq f(S^*)$ **then**
      Mettre $S^* \leftarrow S'$
    end
  else
    Mettre $S \leftarrow S'$ avec la probabilité $\exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right)$
  end
  Fin de Palier Modifier la température T
until;
Critère d'arrêt satisfait
Renvoyer S^*

- **La méthode recherche Tabou :** La recherche Tabou mémorise dans une liste Tabou les solutions précédemment visitées. Cette liste est ensuite utilisée pour éviter de revisiter ces solutions lors de l'exploration du voisinage. Ainsi, durant la recherche locale, le voisinage de la solution courante est restreint aux solutions n'appartenant pas à la liste Tabou. À partir d'une position donnée, l'algorithme explore le voisinage et choisit la position voisine minimisant la fonction objectif f. Le pseudo-code ci-dessous présente l'algorithme de recherche Tabou dans sa forme la plus simple :

Algorithm 4 Pseudo-code du Recherche Tabou [8]

Générer S_0
Initialiser la liste Tabou $T = 0$
Initialiser $S^* = S_0$
repeat
  S solution courante
  Générer un voisinage $V(S)$
  Sélectionner le meilleur voisin $S' \in V(S)$ tel que $S' \notin T$
  if $f(S') \leq f(S^*)$ **then**
    Mettre $S \leftarrow S'$
  end
  Valider le mouvement $S \rightarrow S'$
  Insérer le mouvement $S \rightarrow S'$ dans T
  Mettre à jour la liste tabou
until;
Critère d'arrêt satisfait
Renvoyer S^*

- **Méthodes de Recherche Globale :**
  Ces méthodes, également appelées méthodes à population, visent à atteindre un ou plusieurs optima globaux en améliorant une population de solutions au fil des itérations. La diversité de la population est un facteur clé pour éviter les minima locaux et converger vers une solution optimale.
  Exemples : les algorithmes génétiques, les algorithmes à évolution différentielle, et la recherche dispersée.
- **Métaheuristiques à Solution Unique et Multiple**
  Les métaheuristiques peuvent également être divisées en deux classes en fonction du nombre de solutions qu'elles manipulent :
  - **Métaheuristiques à solution unique :** Elles évoluent avec une seule solution, l'améliorant progressivement.
  - **Métaheuristiques à population de solutions :** Elles améliorent une population de solutions simultanément, utilisant cette population pour maintenir la diversité et explorer plus largement l'espace de recherche.
- **Méthodes Hybrides**
  Récemment, des méthodes hybrides combinant des algorithmes exacts et approchés ont émergé. Ces méthodes visent à tirer parti des points forts de chaque approche pour améliorer le comportement global de l'algorithme. Une méthode hybride peut être soit exacte, donnant une solution optimale, soit approchée, fournissant une solution approximative.

[28]

3.3.6 Problème d'affectation :

Le problème d'affectation est une classe spécifique de problèmes en optimisation combinatoire qui vise à attribuer un ensemble de ressources à un ensemble de tâches de manière à minimiser le coût total ou à maximiser le bénéfice total. Ce problème peut être formulé sous forme de matrice où les lignes représentent les tâches, les colonnes représentent les ressources, et les éléments de la matrice représentent les coûts ou les bénéfices associés à chaque affectation. [16] [38]

Considérons un ensemble de n tâches $\{T_1, T_2, \ldots, T_n\}$ et un ensemble de n agents $\{A_1, A_2, \ldots, A_n\}$. Le coût c_{ij} représente le coût d'affecter la tâche T_i à l'agent A_j. L'objectif est de trouver une affectation des tâches aux agents de manière à minimiser le coût total. Cela peut être formulé comme un programme linéaire en nombres entiers :

$$
\begin{aligned}
\text{minimiser} \quad & \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} \\
\text{sous les contraintes} \quad & \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \quad \text{pour } i = 1, \ldots, n, \\
& \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \quad \text{pour } j = 1, \ldots, n, \\
& x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{pour } i, j = 1, \ldots, n.
\end{aligned}
$$

3.3.6.1 Algorithme Hongrois :

L'algorithme hongrois, également connu sous le nom d'algorithme de Kuhn-Munkres, est une méthode combinatoire qui permet de résoudre de manière efficace le problème d'affectation. Ce dernier consiste à attribuer un ensemble de ressources à un ensemble de tâches de façon à minimiser les coûts totaux ou à maximiser les bénéfices totaux. L'algorithme hongrois se distingue par sa capacité à trouver une solution optimale en temps polynomial, ce qui le rend particulièrement utile pour des applications dans des domaines variés tels que la gestion des ressources humaines, la logistique et l'industrie manufacturière.

L'algorithme a été développé par Harold Kuhn en 1955, inspiré par les travaux de deux mathématiciens hongrois, Dénes Kőnig et Jenő Egerváry, d'où son nom. James Munkres a ensuite apporté des améliorations à l'algorithme, ce qui a conduit à sa forme actuelle. Ces développements ont permis de rendre l'algorithme plus efficace et plus largement applicable. [31] [38]

3.3.6.2 Description de l'Algorithme

L'algorithme hongrois peut être décrit en plusieurs étapes, qui permettent de transformer la matrice de coût initiale pour obtenir une solution optimale. Voici les étapes principales de l'algorithme :

1. **Construction initiale :** Soustraire le plus petit élément de chaque ligne de la matrice des coûts. Ensuite, soustraire le plus petit élément de chaque colonne de la matrice résultante. Cette étape permet de simplifier la matrice sans changer les relations entre les coûts.
2. **Couverture des zéros :** Couvrir tous les zéros de la matrice résultante en utilisant un nombre minimum de lignes horizontales et verticales. Cette étape est essentielle pour identifier si une solution optimale a été atteinte.
3. **Ajustement :** Si le nombre de lignes couvertes est égal au nombre de tâches (ou de ressources), une solution optimale a été trouvée. Sinon, ajuster la matrice en ajoutant et en soustrayant des valeurs appropriées pour créer de nouveaux zéros. Plus précisément, soustraire le plus petit élément non couvert de tous les éléments non couverts et ajouter ce même élément à tous les éléments couverts deux fois. Répéter les étapes de couverture et d'ajustement jusqu'à ce que le nombre de lignes couvertes soit égal au nombre de tâches.

3.3.7 Problème VRP :

Le problème de tournée de véhicules (VRP) est une problématique d'optimisation combinatoire majeure qui consiste à déterminer les routes optimales pour une flotte de véhicules afin de servir un ensemble de clients dispersés géographiquement. Depuis sa première formulation par Dantzig et Ramser en 1959, des centaines d'articles de recherche ont étudié les nombreuses variantes de ce problème NP-difficile.

La variante la plus répandue est le VRP capacité (CVRP) où chaque véhicule a une capacité limitée. D'autres extensions incluent les fenêtres de temps (VRPTW), les multiples

dépôts (MDVRP), les allées et venues (VRPB), les tournées ouvertes (OVRP), les ramassages et livraisons (PDPTW) et les dépendances en site (SDVRP). Cependant, certains aspects pratiques ont été peu explorés comme la possibilité pour un véhicule d'effectuer plusieurs tournées dans une même période.
Cela peut être nécessaire quand les demandes clients sont importantes par rapport aux capacités des véhicules ou quand les fenêtres de temps sont étroites. De plus, le nombre de véhicules est souvent limité et il peut y avoir plusieurs dépôts où les véhicules doivent se réapprovisionner entre les tournées. Dans les zones urbaines par exemple, il est courant que les véhicules effectuent de courtes tournées avant de se recharger et repartir.

Le VRP généralise le problème du voyageur de commerce en déterminant un ensemble de tournées optimales (minimisant la distance totale parcourue ou d'autres objectifs) pour une flotte de véhicules basés à un ou plusieurs dépôts et desservant des clients dispersés. Son enjeu majeur est de permettre des économies substantielles aux entreprises de transport, logistique et services en optimisant leurs opérations. [20]

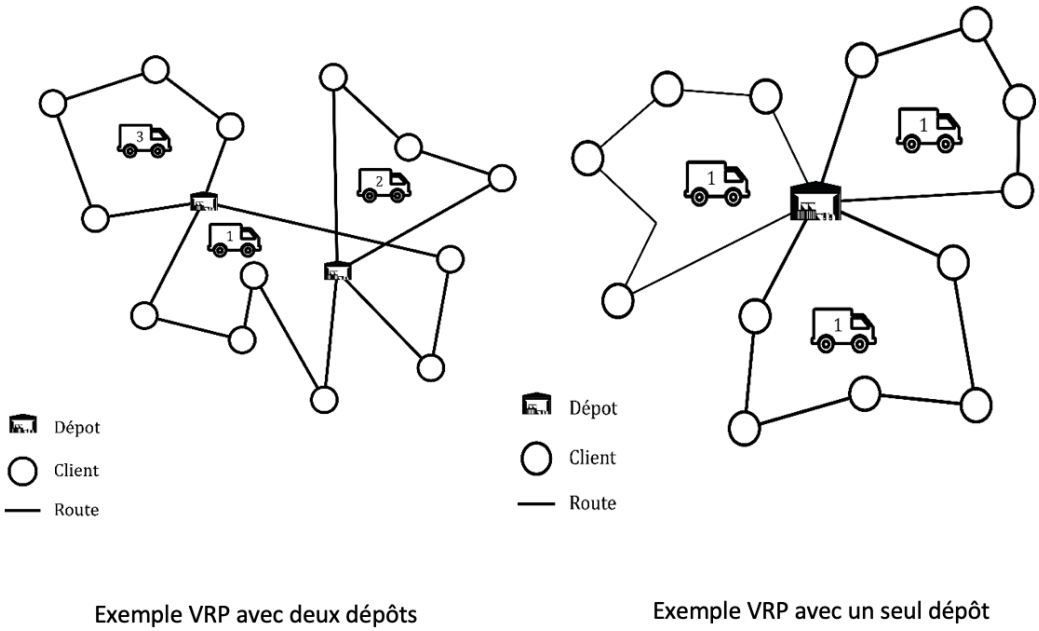


Figure 3.2 – Phases du projet

3.3.8 Les variantes du VRP traitées par l'API VROOM

[8]

CVRP (capacitated VRP) :

Une variante clé du VRP est le problème de tournée de véhicules avec contraintes de capacité (CVRP). Dans ce cas, chaque véhicule de la flotte a une capacité de chargement limitée en termes de quantité, taille, poids, etc. Ainsi, la demande totale des clients desservis sur une même tournée ne doit pas excéder la capacité du véhicule.
Cette contrainte de capacité est quasiment toujours présente dans les applications réelles du VRP, mais son degré d'influence varie. Par exemple, pour le transport de marchandises impliquant de grandes quantités, la capacité est une contrainte majeure à prendre en

compte. Alors que pour les services postaux avec de petits colis, elle a un impact moindre mais reste néanmoins une limitation à considérer.
La capacité limitée des véhicules empêche de servir tous les clients sur une même tournée. Cela implique de déterminer un ensemble de tournées optimisées respectant ces limites de chargement, en plus des autres objectifs classiques du VRP comme minimiser la distance totale parcourue.

VRPTW (VRP with time windows) :

Une autre variante majeure du VRP est le problème de tournée de véhicules avec fenêtres de temps (VRPTW). Dans ce cas, une contrainte temporelle supplémentaire s'applique : chaque client doit être servi durant une fenêtre de temps prédéfinie. Respecter ces créneaux horaires est obligatoire, sous peine de pénalités en cas de retard.
Cette situation reflète de nombreux cas concrets comme la livraison de produits périssables (laitiers, etc.), la distribution de journaux, ou encore les services à domicile qui nécessitent d'arriver à des horaires précis. Le non-respect des fenêtres de temps est donc inacceptable pour ce type d'applications.
Le VRPTW peut également être combiné à la contrainte de capacité, donnant le problème CVRPTW (Capacitated VRP with Time Windows). D'autres déclinaisons existent comme le PDPTW (Pickup and Delivery Problem with Time Windows) impliquant à la fois des ramassages et des livraisons avec respect des fenêtres de temps.
La prise en compte de ces fenêtres temporelles complexifie grandement le problème d'optimisation des tournées par rapport au VRP classique.

MDHVRPTW (multi-depot heterogeneous VRPTW) :

Il s'agit de déterminer les tournées optimales pour une flotte de véhicules hétérogènes (ayant des capacités et caractéristiques différentes), basée dans plusieurs dépôts distincts, afin de servir un ensemble de clients répartis géographiquement. Chaque client doit être livré pendant une fenêtre de temps spécifique, en respectant strictement ces contraintes temporelles.
La difficulté vient de la combinaison de plusieurs aspects :

- Multiples dépôts d'où les véhicules partent et doivent revenir
- Flotte hétérogène nécessitant une affectation judicieuse des types de véhicules
- Fenêtres de temps à respecter impérativement pour chaque client
- Optimisation des tournées elles-mêmes pour minimiser les distances/coûts

Il faut donc déterminer simultanément la composition des tournées, l'affectation des véhicules, et le séquencement des visites de manière à satisfaire au mieux tous les clients en temps voulu au moindre coût opérationnel.

PDPTW (pickup-and-delivery problem with TW) :

Le PDPTW est une variante du VRP qui combine le transport de marchandises avec des opérations de ramassage et de livraison, tout en intégrant des contraintes de fenêtres de temps à respecter.
Concrètement, chaque véhicule doit d'abord aller récupérer (ramasser) des marchandises à certains points avant de pouvoir effectuer les livraisons à d'autres points. Un même

véhicule réalise donc à la fois des tâches de collecte et de distribution sur sa tournée. Cette double contrainte de ramassages/livraisons et de respect des fenêtres temporelles complexifie grandement le problème d'optimisation des tournées par rapport à un VRP classique.
Le PDPTW permet de modéliser des cas très concrets comme la livraison de produits frais ramassés chez des fournisseurs, les services de coursiers, ou encore les transports de patients vers/depuis des établissements de santé avec des rendez-vous à honorer.

Modélisation Mathématique du Problème de Tournées de Véhicules avec Capacités (CVRP) :

L'objectif est de déterminer un ensemble de routes pour une flotte de véhicules, de manière à desservir tous les clients tout en minimisant le coût total et en respectant les contraintes de capacité.

Données et Paramètres :

- $G = (V, E)$: un graphe où $V = \{0, 1, \ldots, n\}$ est l'ensemble des sommets, avec 0 représentant le dépôt et $1, \ldots, n$ représentant les clients.
- c_{ij} : le coût (ou la distance) de déplacement entre le sommet i et le sommet j.
- d_i : la demande du client i.
- Q : la capacité maximale de chaque véhicule.
- K : le nombre de véhicules disponibles.

Variables de Décision :

- x_{ij}^k : variable binaire indiquant si le véhicule k utilise l'arête (i, j) (1 si vrai, 0 sinon).
- u_i : variable continue représentant la charge cumulée livrée au sommet i.

Fonction Objectif : Minimiser le coût total de distribution :

$$\min \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} c_{ij} x_{ij}^k$$

Contraintes :

1. Chaque client est visité exactement une fois par un seul véhicule :

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=0, j \neq i}^{n} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i = 1, \ldots, n$$

2. Les véhicules partent et reviennent au dépôt :

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k = 1, \ldots, K$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i0}^k = 1 \quad \forall k = 1, \ldots, K$$

3. Flux de véhicules pour assurer des routes fermées :

$$\sum_{i=0,i\neq j}^{n} x_{ij}^{k} = \sum_{i=0,i\neq j}^{n} x_{ji}^{k} \quad \forall j = 1,\ldots,n, \forall k = 1,\ldots,K$$

4. Capacité des véhicules :

$$u_i - u_j + Q x_{ij}^{k} \leq Q - d_j \quad \forall i,j = 1,\ldots,n, i \neq j, \forall k = 1,\ldots,K$$

$$d_i \leq u_i \leq Q \quad \forall i = 1,\ldots,n$$

5. Domaines des variables :

$$x_{ij}^{k} \in \{0,1\} \quad \forall i,j = 0,\ldots,n, \forall k = 1,\ldots,K$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i = 1,\ldots,n$$

3.3.9 Algorithme génétique

Les algorithmes génétiques (AG) représentent une classe puissante et flexible d'algorithmes d'optimisation inspirés par les principes de la sélection naturelle et de l'évolution biologique de Charles Darwin. Ils ont été introduits par John Holland dans les années 1960 et sont devenus un outil important pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation dans divers domaines tels que la physique, la biologie, l'économie et la sociologie.

La base des algorithmes génétiques repose sur l'idée que le pool génétique d'une population contient potentiellement la solution optimale à un problème donné. Ce principe est exploité par des processus de sélection, croisement et mutation qui imitent la manière dont les organismes vivants évoluent et s'adaptent à leur environnement. Ainsi, les solutions possibles sont codées sous forme de chaînes binaires, représentant les chromosomes, et une population initiale de solutions est générée de manière aléatoire.
Chaque individu de cette population se voit attribuer une valeur d'adaptation basée sur sa proximité avec l'objectif recherché. Les individus les mieux adaptés sont sélectionnés pour se reproduire, permettant ainsi aux caractéristiques favorables de se propager dans les générations suivantes. Les opérateurs de croisement et de mutation sont alors appliqués pour créer de nouvelles solutions, enrichissant le pool génétique et augmentant les chances de trouver une solution optimale.

L'efficacité des algorithmes génétiques réside dans leur capacité à explorer un large espace de solutions de manière simultanée et à éviter les minima locaux, un problème courant dans les méthodes d'optimisation traditionnelles. Bien que le processus soit intrinsèquement stochastique et ne garantisse pas toujours une convergence vers la solution optimale, les algorithmes génétiques sont largement utilisés en raison de leur robustesse et de leur adaptabilité à des problèmes complexes et non linéaires.[2] [43]

3.3.9.1 Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique

Le fonctionnement d'un algorithme génétique repose sur plusieurs étapes clés, chacune contribuant à l'évolution d'une population de solutions potentielles vers une solution optimale.[24]

1. **Initialisation :** Le processus débute par la génération d'une population initiale composée de solutions candidats du problème à résoudre, appelées individus. Cette population est créée de manière aléatoire ou basée sur une heuristique, assurant une diversité génétique qui est déterminante pour la recherche d'une solution optimale. Chaque individu est généralement représenté sous forme de chaînes de caractères (souvent binaires) qui encodent les paramètres du problème.
2. **Évaluation :** Chaque individu de la population est évalué à l'aide d'une fonction d'adaptation (fitness), qui mesure la qualité ou l'adéquation de la solution par rapport à l'objectif à optimiser. La fonction d'adaptation peut représenter directement la fonction objective du problème, fournissant un score qui guide le processus évolutif. Cette étape est fondamentale car elle détermine quels individus sont les plus aptes à survivre et à se reproduire.
3. **Sélection :** Les individus de la population sont sélectionnés en fonction de leur valeur d'adaptation pour participer à la création de la nouvelle population. Les individus ayant une meilleure fonction d'adaptation, c'est-à-dire étant les mieux adaptés, ont une plus grande probabilité d'être sélectionnés. Cette sélection peut être effectuée par diverses méthodes, telles que la roulette, le tournoi ou la sélection par rang, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients en termes de diversité et de convergence.
4. **Opérateurs génétiques :** Une fois les individus sélectionnés, des opérateurs génétiques tels que le croisement (crossover) et la mutation sont appliqués pour générer une nouvelle population. Le croisement combine les caractéristiques de deux parents pour produire une ou plusieurs nouvelles solutions, tandis que la mutation introduit des variations aléatoires, contribuant à la diversité génétique et empêchant la stagnation dans des optima locaux. Les types courants de croisement incluent le croisement à un point, le croisement à deux points et le croisement uniforme.
5. **Itération :** Ce processus de sélection, croisement et mutation est répété sur plusieurs générations. À chaque itération, l'espoir est que la nouvelle population sera meilleure que la précédente, se rapprochant progressivement de la solution optimale. Ce cycle continue jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint, tel qu'un nombre maximal de générations, une amélioration négligeable de la fonction d'adaptation ou la satisfaction d'un critère de performance spécifique.

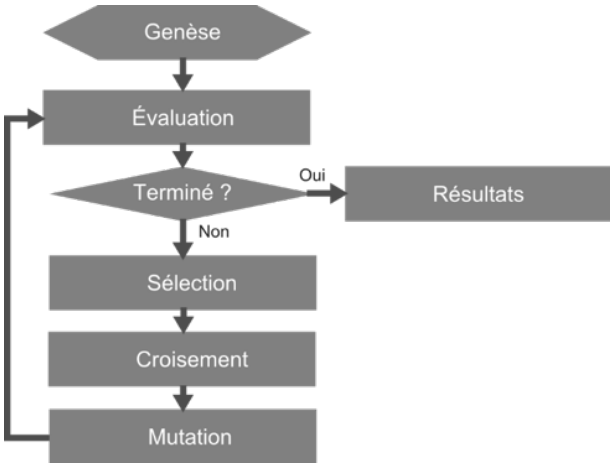


FIGURE 3.3 – Fonctionnement d'un algorithme génétique [10]

3.3.9.2 Caractéristiques des Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques se distinguent des autres méthodes d'optimisation par plusieurs caractéristiques uniques :

- **Codage des paramètres :** Ils utilisent un codage des paramètres (par exemple, des chaînes binaires) au lieu des paramètres eux-mêmes, ce qui permet une plus grande flexibilité dans la représentation des solutions. Ce codage facilite également la manipulation des solutions par les opérateurs génétiques.
- **Population de solutions :** Contrairement à d'autres approches qui travaillent sur une seule solution à la fois, les algorithmes génétiques manipulent une population entière de solutions, facilitant la recherche dans un espace de solutions multidimensionnel et augmentant la performance de l'algorithme face aux minima locaux.
- **Aucune condition préalable sur la fonction :** Ils ne posent aucune contrainte sur la nature des fonctions à optimiser, rendant cette technique largement applicable à divers types de problèmes, y compris ceux avec des paysages de fitness complexes ou discontinus.
- **Règles de transition probabilistes :**Les transitions entre générations sont basées sur des règles probabilistes plutôt que déterministes, ce qui contribue à l'utilité et à la capacité des algorithmes génétiques à échapper aux minima locaux. Cette approche stochastique assure une exploration efficace de l'espace de recherche.

3.3.9.3 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)

Le Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) est un algorithme d'optimisation multi-objectifs largement utilisé en raison de son efficacité et de sa puissance. Il a été développé par Kalyanmoy Deb et al. en 2002 comme une amélioration de l'algorithme NSGA original. NSGA-II se distingue par sa capacité à gérer des problèmes d'optimisation avec plusieurs objectifs conflictuels sans nécessiter de paramètres supplémentaires pour le partage des niches et en offrant une complexité algorithmique plus faible. L'algorithme **Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)** fonctionne comme suit :

- La population R_t, t représente le numéro de la génération courante.
- La population R_t est classée en deux sous-populations, chaque sous-population est de taille N.

➢ P_t : correspond aux parents.

➢ Q_t : correspond aux enfants après la recombinaison.

[2]

3.3.9.4 Fonctionnement de NSGA-II

NSGA-II opère en utilisant une approche évolutionnaire inspirée par les principes de la sélection naturelle et de la génétique. L'algorithme commence par initialiser une population aléatoire de solutions potentielles. Chaque solution est évaluée en fonction de plusieurs critères d'optimisation. Contrairement aux algorithmes mono-objectifs qui se concentrent sur une seule fonction objectif, NSGA-II traite simultanément plusieurs fonctions objectifs, cherchant à minimiser ou maximiser chacune d'elles.[24]

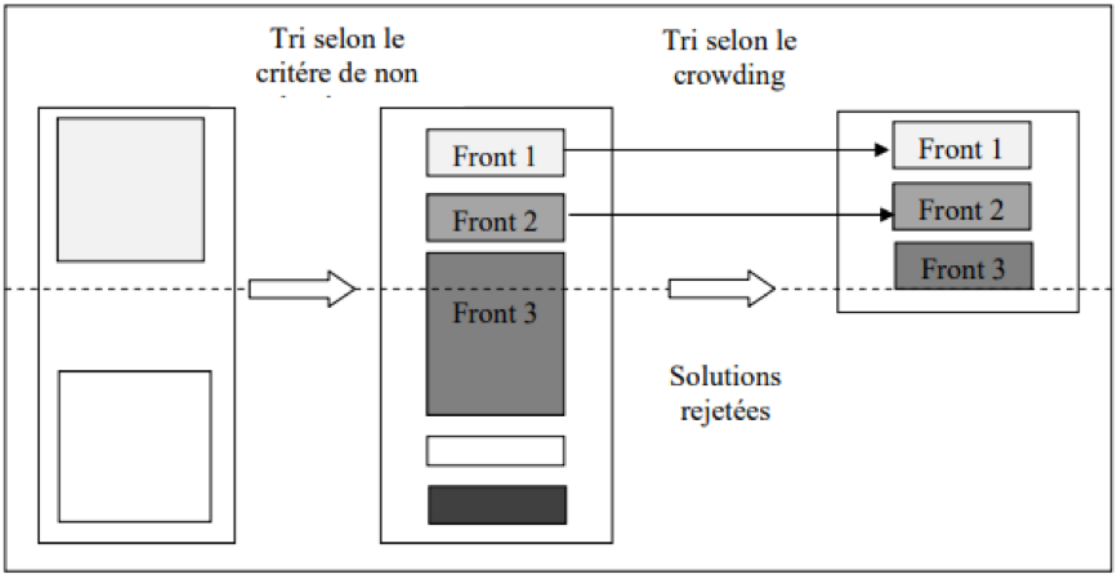


FIGURE 3.4 – Fonctionnement de NSGA -II [23]

3.3.9.5 Classement Non-dominé et Distance de Crowding

Une des caractéristiques clés de NSGA-II est son utilisation du classement non-dominé (non-dominated sorting) pour organiser les solutions en différentes "fronts" ou niveaux. Les solutions du premier front ne sont dominées par aucune autre solution, celles du deuxième front sont dominées par celles du premier front mais non par celles du deuxième front, et ainsi de suite. Cette stratification permet de visualiser et de gérer l'ensemble des solutions de manière structurée.

En parallèle, NSGA-II utilise la distance de crowding pour maintenir la diversité des solutions au sein de chaque front. La distance de crowding mesure la densité de solutions avoisinantes et favorise celles qui se trouvent dans des régions moins peuplées de l'espace des solutions, contribuant ainsi à une meilleure exploration de l'espace de recherche.

Le processus évolutif de NSGA-II suit des étapes typiques de sélection, croisement et mutation :

1. **Sélection :** Les solutions sont sélectionnées en utilisant un tournoi basé sur le classement non-dominé et la distance de crowding. Les solutions mieux classées et celles situées dans des régions moins peuplées ont plus de chances d'être sélectionnées.
2. **Croisement (Crossover) :** Les solutions sélectionnées subissent un croisement pour produire une nouvelle génération de solutions. Le croisement permet de combiner les caractéristiques de deux solutions parents pour générer une ou plusieurs solutions enfants.
3. **Mutation :** Les solutions enfants subissent ensuite des mutations aléatoires. La mutation introduit de nouvelles caractéristiques dans les solutions, favorisant la diversité génétique et évitant la stagnation dans des optima locaux.

3.4 Partie 03 : Optimisation multi-objectif

L'un des principaux défis de l'optimisation mono-objectif réside dans la difficulté de modéliser un problème sous la forme d'une seule équation, ce qui peut induire des biais dans la modélisation. L'optimisation multi-objectif offre une plus grande flexibilité en permettant d'optimiser simultanément plusieurs objectifs, mais soulève d'autres difficultés.

Au lieu d'aboutir à une solution unique, la recherche multi-objectif produira un ensemble de solutions dites de Pareto ou solutions de compromis, formant une surface de compromis. Il faudra ensuite sélectionner une de ces solutions, celle qui reflétera au mieux les compromis établis par le décideur entre les différentes fonctions objectifs souvent contradictoires. L'un des objectifs de l'optimisation multi-objectif est donc de modéliser ces préférences du décideur.

Un autre défi clé sera le choix de la méthode d'optimisation multi-objectif appropriée parmi différentes familles de méthodes. Certaines méthodes dites a priori établissent le compromis désiré entre les objectifs avant même l'optimisation, ne nécessitant alors qu'une seule recherche pour trouver la solution correspondante.

L'optimisation multi-objectif vise à optimiser simultanément plusieurs fonctions objectifs souvent contradictoires, comme maximiser le rendement tout en minimisant la volatilité en allocation d'actifs. Il n'existe alors potentiellement pas de solution optimale pour tous les critères. On recherche donc des solutions de compromis satisfaisantes, tout en respectant d'éventuelles contraintes supplémentaires. La pertinence de l'optimisation multi-objectif soulève des questionnements intéressants. Bien que le but ici ne soit pas d'apporter une réponse définitive, deux éléments de réflexion méritent d'être soulignés. Premièrement, on peut se demander si tous les problèmes peuvent réellement se limiter à un seul objectif. La réponse est clairement non, comme l'illustre un problème classique : l'élaboration de tournées de véhicules avec contraintes de capacité.

Dans ce problème, il s'agit de trouver un ensemble de tournées partant d'un dépôt pour une flotte de véhicules de capacité donnée, afin de répondre aux demandes des clients. Comme la demande totale excède la capacité d'un seul véhicule, les clients doivent être répartis sur plusieurs tournées attribuées aux différents véhicules. Alors que l'objectif classique consiste à minimiser la somme des longueurs des tournées, un objectif supplémentaire entre en jeu si l'on considère l'équité entre les conducteurs via l'équilibrage des

distances parcourues. On peut illustrer un problème d'optimisation multi-objectifs de la façon suivante :

$$(P) : \begin{cases} \text{Max } Z_1 = f_1(x) \\ \text{Max } Z_2 = f_2(x) \\ \vdots \\ \text{Max } Z_p = f_p(x) \\ \text{S.C.} \\ x \in \Omega \end{cases}$$

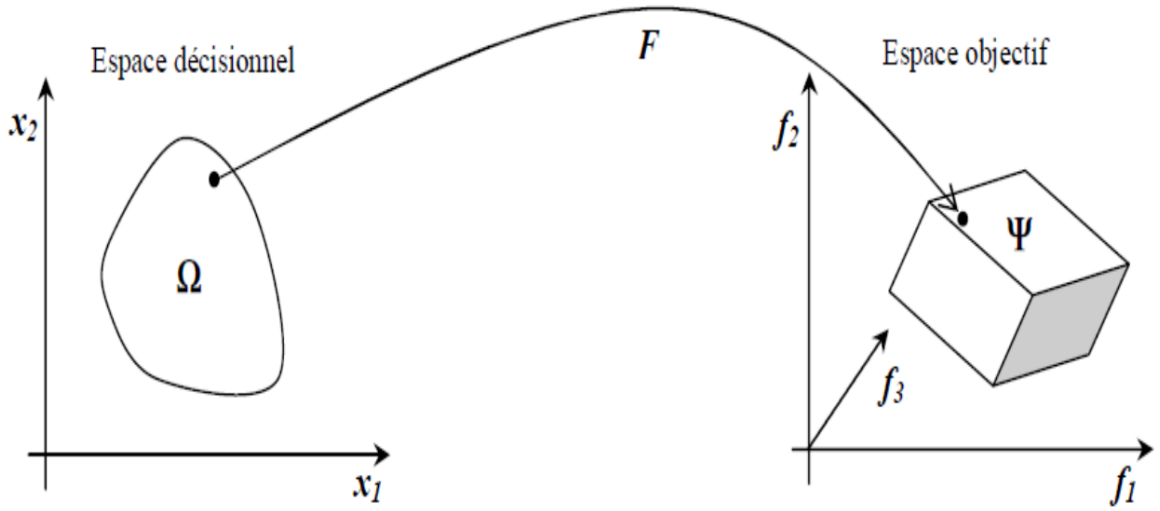


FIGURE 3.5 – problème d'optimisation multi-objectifs [2]

En optimisation multi-objectif, les problèmes impliquent la maximisation ou la minimisation simultanée de plusieurs objectifs souvent conflictuels. Contrairement à l'optimisation mono-objectif, il n'existe généralement pas de solution unique qui optimise tous les objectifs simultanément. À la place, on utilise le concept de solution de Pareto ou optimalité de Pareto pour définir un ensemble de solutions optimales.

Une solution est dite optimale au sens de Pareto si aucune autre solution ne peut améliorer un des objectifs sans détériorer au moins un autre objectif. Formulée autrement, une solution x^* est une solution de Pareto si, pour tout autre solution x de l'ensemble des solutions possibles Ω, on a :

$$\exists x \notin \Omega \mid \forall i \in \{1, \ldots, k\}, f_i(x) \leq f_i(x^*) \text{ et } \exists j \in \{1, \ldots, k\} \mid f_j(x) < f_j(x^*)$$

Où $f_i(x)$ représente les fonctions objectifs.

L'ensemble des solutions optimales de Pareto forme ce qu'on appelle le front de Pareto. Le front de Pareto représente l'ensemble des compromis optimaux entre les différents objectifs. Graphiquement, dans le cas de deux objectifs, il peut être représenté comme une courbe dans un espace bidimensionnel, chaque point sur cette courbe étant une solution de Pareto. [5]

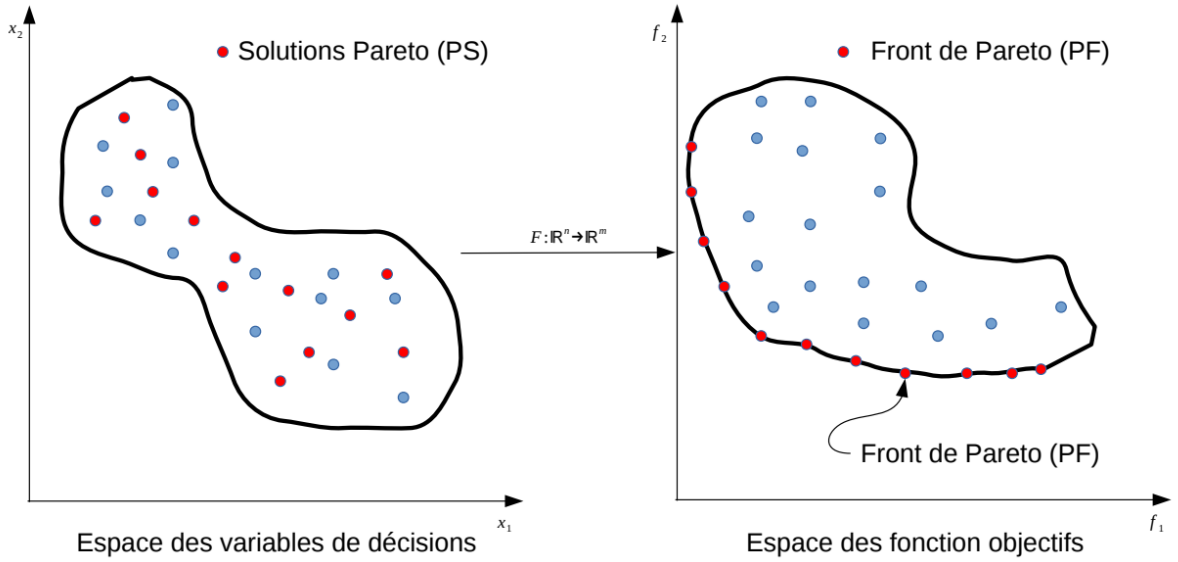


FIGURE 3.6 – L'ensemble Pareto et son image dans l'espace objectif[2]

3.4.1 L'analyse multicritères d'aide à la décision

L'analyse multicritères d'aide à la décision est une approche visant à résoudre des problématiques complexes nécessitant la prise en compte simultanée de multiples critères ou objectifs, parfois contradictoires. Contrairement aux méthodes classiques d'optimisation monocritère basées sur une unique fonction économique, cette approche permet d'intégrer de manière explicite la diversité des enjeux et des contraintes inhérents à toute décision.

Lorsqu'un problème multicritère se pose, l'enjeu est d'identifier la solution la plus adéquate au regard d'un ensemble de critères pouvant être de natures variées : économiques, environnementaux, sociaux, techniques, etc. Ces critères peuvent entrer en conflit les uns avec les autres.

Afin de mener à bien une telle analyse, différentes méthodologies et techniques peuvent être mises en œuvre. Celles-ci se distinguent par leur manière d'intégrer et de pondérer les différents critères, ainsi que par leur approche de comparaison des alternatives envisageables. Parmi les méthodes les plus répandues, on peut citer la programmation linéaire multicritère, les méthodes d'agrégation complète ou partielle, les approches ELECTRE, PROMETHEE, AHP, etc.

L'objectif poursuivi par l'analyse multicritères est de fournir un cadre structuré et rigoureux permettant d'évaluer les différentes options disponibles, en intégrant la complexité et les multiples dimensions du problème décisionnel. Cette approche offre ainsi aux décideurs un moyen d'appréhender au mieux la réalité des situations complexes, en vue d'aboutir à des choix éclairés.

En définitive, l'analyse multicritères d'aide à la décision constitue un outil méthodologique puissant et flexible pour traiter les problèmes décisionnels complexes en intégrant explicitement leurs multiples facettes et contraintes. Elle fournit un cadre solide permettant aux décideurs de prendre des décisions avisées, en considérant la diversité des critères et des enjeux en présence.[3]

3.4.2 Composants Des Problèmes MCDA

Les problèmes d'Analyse Multicritères d'Aide à la Décision (MCDA) sont méthodiquement structurés pour évaluer plusieurs options ou alternatives en tenant compte de multiples critères de décision. Cette approche permet de comparer les alternatives de manière exhaustive et équilibrée. Les composants principaux des problèmes MCDA comprennent :

Le décideur : Le décideur est l'individu ou le groupe d'individus qui a la responsabilité de prendre la décision finale. Son rôle consiste à définir les objectifs du problème, à spécifier les critères et les alternatives à considérer, à exprimer ses préférences et à valider les résultats de l'analyse MCDA. Il est essentiel que le décideur soit impliqué dans le processus MCDA à toutes les étapes, afin de s'assurer que l'analyse répond à ses besoins et qu'il ait confiance dans les résultats obtenus.

L'analyste : L'analyste est la personne ou l'équipe de personnes qui facilite le processus MCDA et aide le décideur à prendre sa décision. Son rôle consiste à collecter des informations pertinentes, à structurer le problème de manière appropriée, à sélectionner et à appliquer les méthodes MCDA les plus adaptées, à présenter les résultats au décideur et à l'aider à les interpréter correctement. L'analyste doit avoir une bonne compréhension des méthodes MCDA, des techniques de modélisation et des processus de prise de décision. Il doit également être capable de communiquer efficacement avec le décideur et les autres parties prenantes [10].

Les éléments d'analyse :

- **Les alternatives :** Les alternatives représentent les différentes options possibles parmi lesquelles le décideur doit choisir. Ces alternatives peuvent être des objets concrets, tels que des produits, des projets ou des investissements, ou des concepts abstraits, tels que des stratégies ou des politiques.
- **Les critères :** Les critères sont les facteurs importants que le décideur doit prendre en compte lors de l'évaluation des alternatives. Ces critères peuvent être quantitatifs, comme le coût ou le rendement, ou qualitatifs, comme la qualité ou la satisfaction du client.
- **Les valeurs des critères :** Pour chaque alternative, on attribue une valeur pour chaque critère, reflétant la performance de cette alternative par rapport au critère en question. Ces valeurs des critères peuvent être exprimées en unités physiques, en valeurs monétaires ou dans d'autres unités appropriées.
- **Les poids des critères :** Les poids des critères représentent l'importance relative que le décideur accorde à chaque critère lors de la prise de décision. Ces poids reflètent les préférences du décideur et permettent de pondérer correctement les différents critères dans l'analyse.

Matrice de décision : La matrice de décision permet de comparer plusieurs alternatives (options, candidats, solutions) selon divers critères pour aider à la prise de décision. Chaque ligne de la matrice représente une alternative, et chaque colonne représente un critère. Voici un exemple :

	CRITÈRES				
Alternatives	C1	C2	C3	...	CN
Poids relatifs	W_1	W_2	W_3	...	W_N
A1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1N}
A2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2N}
A3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
AM	a_{M1}	a_{M2}	a_{M3}	...	a_{MN}

Tableau 3.1 – Matrice de décision

3.4.3 Processus d'Aide à La Décision Multicritère

Le processus d'analyse multicritères d'aide à la décision est itératif et non linéaire, mais peut être décomposé en un ensemble d'étapes clés visant à structurer la démarche et à aboutir à un choix éclairé. Comme illustré dans la figure X, ces étapes consistent à :

Figure 3.7 – Processus d'Aide à La Décision [2]

3.4.4 Méthodes d'Agrégation :

Les méthodes d'agrégation sont fondamentales en Analyse Multicritères d'Aide à la Décision (MCDA). Elles combinent les évaluations des différents critères pour produire un score global pour chaque alternative. Cette étape est essentielle pour permettre une comparaison systématique et un classement efficace des alternatives. Grâce à ces méthodes, les décideurs peuvent synthétiser des informations complexes et multiples en un seul indicateur global, facilitant ainsi la prise de décision éclairée et équilibrée.

Méthode	Type d'agrégation	Critères	Pondération	Avantages	Inconvénients
WSM (Somme pondérée)	Agrégation totale	Quantitatifs	Oui	Simple, connue, pas de modification du problème sous-jacent	Nécessité d'homogénéité des unités et des échelles des critères
WPM (Produit des ratios pondérés)	Agrégation totale	Quantitatifs	Oui	Similaire à WSM mais utilise le produit au lieu de la somme	Nécessité d'homogénéité des unités et des échelles des critères
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Agrégation totale	Qualitatifs et quantitatifs	Oui	Permet de structurer le problème de décision de manière hiérarchique	Nécessité de comparaisons par paires, risque d'inconsistance des jugements
ELECTRE	Agrégation partielle	Qualitatifs et quantitatifs	Non	Permet de prendre en compte des critères qualitatifs et quantitatifs sans compensation	N'a pas de compensation entre les critères
PROMETHEE	Agrégation partielle	Qualitatifs et quantitatifs	Oui	Utilise l'agrégation partielle, pratique pour un nombre d'alternatives fini	N'a pas de compensation entre les critères

Tableau 3.2 – Comparaison des méthodes d'agrégation

3.4.5 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

Dans le cadre du développement de notre solution ERP, nous avons intégré la méthode d'analyse multi-critères AHP (Analytic Hierarchy Process) pour optimiser le processus de sélection des fournisseurs au sein du module de gestion des achats. Cette approche vise à

aider les décideurs à prendre des décisions éclairées et objectives lors du choix des fournisseurs, en tenant compte de multiples critères pertinents.
Le processus d'approvisionnement est un élément capital pour toute entreprise, car il a un impact direct sur la qualité des produits ou services fournis, les coûts opérationnels et la satisfaction des clients. Cependant, la sélection des fournisseurs peut s'avérer complexe, impliquant l'évaluation de critères tels que le prix, les délais de livraison, les conditions de paiement, la qualité des produits, la réputation du fournisseur, entre autres.
C'est dans ce contexte que la méthode AHP offre un cadre structuré et analytique pour pondérer et hiérarchiser ces différents critères en fonction de leur importance relative. Les décideurs peuvent ainsi comparer les fournisseurs potentiels de manière systématique, en tenant compte de leurs performances respectives par rapport à chaque critère.

L'intégration de l'AHP dans notre module de gestion des achats permet aux utilisateurs de définir leurs propres critères d'évaluation et de leur attribuer des priorités en fonction des besoins spécifiques de leur entreprise. Grâce à cette méthode, les décideurs peuvent prendre des décisions plus objectives et transparentes, en minimisant les risques de parti pris ou de subjectivité excessive. De plus, l'AHP offre la possibilité d'effectuer des analyses de sensibilité, permettant d'évaluer l'impact de la modification des pondérations des critères sur le classement final des fournisseurs.
Cette fonctionnalité offre une meilleure compréhension des compromis potentiels et facilite la prise de décision dans des situations complexes. En incorporant l'AHP dans notre solution ERP, nous avons renforcé les capacités de gestion des achats en fournissant aux décideurs un outil puissant pour optimiser leurs choix de fournisseurs. Cette approche contribue à améliorer l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement, à réduire les coûts et à garantir la qualité des produits et services fournis à nos clients.

3.4.5.1 Les étapes de l'AHP :

1. **Étape 1 : Définir l'objectif**
   - **Objectif :** Choisir le meilleur fournisseur parmi plusieurs candidats.
   - **Contexte :** Déterminez les besoins spécifiques de l'entreprise, les contraintes du marché, et les exigences des parties prenantes.
2. **Étape 2 : Identifier les critères de sélection**
   - **Critères typiques :**
     - **Coût :** Le prix des produits ou services fournis.
     - **Qualité :** La qualité des produits ou services.
     - **Délais de livraison :** La rapidité et la fiabilité des livraisons.
     - **Capacité de production :** La capacité du fournisseur à répondre aux volumes demandés.
     - **Flexibilité :** La capacité à s'adapter aux changements de demandes.
     - **Localisation :** La proximité géographique.
     - **Service après-vente :** La qualité du support après l'achat.
     - **Réputation :** La réputation du fournisseur sur le marché.
3. **Étape 3 : Construire la hiérarchie AHP**
   Il s'agit de décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique avec plusieurs niveaux :

- **Niveau 0 :**Objectif global (choisir le meilleur fournisseur).
- **Niveau 1 :**Critères de sélection (par exemple, coût, qualité, délais).
- **Niveau 2 :**Alternatives (fournisseurs A, B, C, etc.).

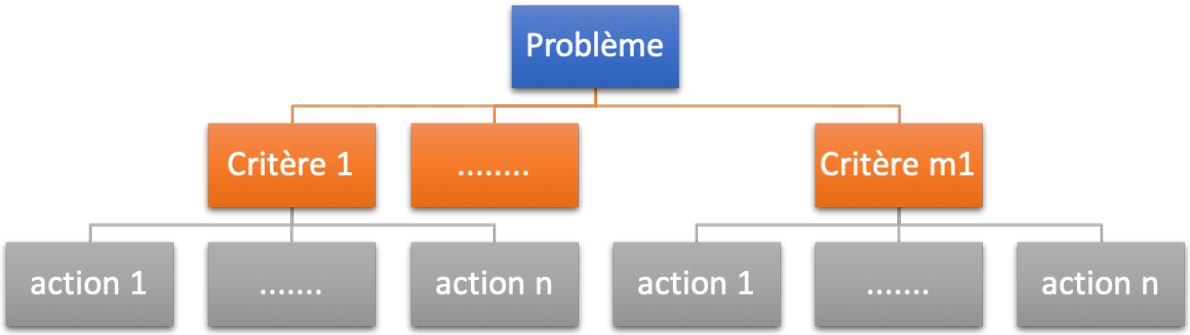


FIGURE 3.8 – La décomposition d'un probème dans le cas d'un seul décideur [21]

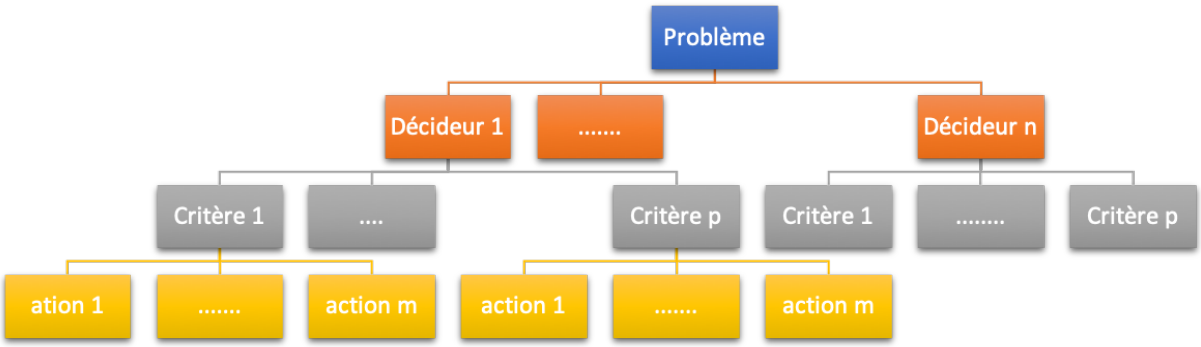


FIGURE 3.9 – La décomposition d'un probème dans le cas de plusieurs décideurs [21]

Saaty recommande de limiter le nombre de critères ou d'alternatives pertinentes à 7 au maximum par niveau.
Une analyse fonctionnelle du projet, comme préconisée dans l'Analyse de la Valeur, peut être utile pour identifier les critères d'évaluation à inclure dans la structure hiérarchique.

4. **Étape 4 : Effectuer les combinaisons binaires**
   Cette étape consiste à comparer par paires tous les éléments de même niveau hiérarchique, par rapport à l'élément de niveau supérieur, en utilisant l'échelle de Saaty.
5. **Échelle de Saaty :** Utiliser une échelle allant de 1 (également important) à 9 (extrêmement plus important).

Degré d'importance	**Définition**
1	Importance égale des deux éléments.
3	Un élément est un peu plus important que l'autre.
5	Un élément est plus important que l'autre.
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre.
9	Un élément est absolument important que l'autre.
2, 4, 6, 8	Valeur intermédiaire entre deux jugements, utilisées pour affiner le jugement.

Tableau 3.3 – L'échelle numérique de Saaty

Les résultats de ces comparaisons par paires sont consignés dans une matrice carrée appelée "matrice des jugements" de dimension (K x K), où K est le nombre d'éléments comparés. Chaque entrée de la matrice représente le rapport des poids entre la paire d'éléments correspondante.
À l'issue de cette étape, on obtient donc la matrice des jugements complète, synthétisant les comparaisons par paires des éléments du même niveau. On obtient de cette façon :

$$a = a_{ij} \quad \text{avec} \quad a_{jj} = 1 \quad \text{et} \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \text{ (valeur réciproque)}$$

a_{ij} **:** *Une valeur déterminée à l'aide de l'échelle de Saaty.*

a_{jj} **:** *C'est la valeur de la diagonale c'est-à-dire lorsqu'on compare un élément à lui-même, elle prend toujours la valeur de 1.*

Soit B la matrice de jugement du premier niveau $B = [b_{ij}]_{(m\times m)}$, où :

- m : le nombre de critères.
- b_{ij} : le coefficient d'importance relative du critère C_j par rapport au critère C_i.

Critères	C_1	C_2	$\cdots$	C_m
C_1	1	b_{12}	$\cdots$	b_{1m}
C_2	$\frac{1}{b_{12}}$	1	$\cdots$	b_{2m}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
C_m	$\frac{1}{b_{1m}}$	$\frac{1}{b_{2m}}$	$\cdots$	1

Tableau 3.4 – Matrice B des jugements relatifs du niveau (1)

De la même manière le décideur accomplit les matrices de jugement entre chaque critère et ses sous-critères. La matrice de jugements des alternatives par rapport à chaque critère j est notée $D_j = [\delta_{ik}(j)]_{(n\times n)}$:

Alternatives	A_1	A_2	$\cdots$	A_n
A_1	1	$\delta_{12}(j)$	$\cdots$	$\delta_{1n}(j)$
A_2	$\frac{1}{\delta_{12}(j)}$	1	$\cdots$	$\delta_{2n}(j)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
A_n	$\frac{1}{\delta_{1n}(j)}$	$\frac{1}{\delta_{2n}(j)}$	$\cdots$	1

Tableau 3.5 – Matrice D des jugements relatifs du niveau (2)

6. **Étape 5 : Déterminer les priorités**
   - À partir des évaluations obtenues lors de l'étape précédente, calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie.
   - La détermination des priorités des éléments de chaque matrice s'effectue en résolvant le problème de vecteurs propres.
   - L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur propre normalisé à 1.0. Plus la valeur associée à un critère est élevée, plus ce critère est considéré comme important.
7. **Étape 6 : Comparer les alternatives selon chaque critère (Synthétiser les priorités)**
   - Une fois que les priorités locales pour tous les critères présents dans la hiérarchie ont été déterminées, la méthode AHP calcule un score d'évaluation global attribué à chacune des solutions alternatives identifiées.
   - On obtient alors un vecteur $(pi_1, pi_2, ..., pi_n)$ qui indique l'impact ou l'influence du critère i sur chacune des alternatives considérées.
   - Ce vecteur représente le vecteur propre principal de la matrice réciproque de dimension nxm, où n est le nombre de critères et m le nombre d'alternatives.

   - **Matrice de comparaison par critère :** Pour chaque critère, comparer les fournisseurs deux par deux.
   - **Notes :** Attribuer des notes sur la même échelle utilisée pour les critères.
8. **Étape 7 : Calculer les scores globaux des alternatives**
   - **Multiplication des notes par les poids**Pour chaque critère, multiplier les notes des fournisseurs par les poids des critères.
   - **Somme des produits :** Additionner les produits pour obtenir un score global pour chaque fournisseur.
9. **Étape 8 : Vérifier la cohérence**
   - **Indice de cohérence (IC) :** Calculer IC pour évaluer la cohérence des comparaisons.
     $IC = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)$, où $\lambda_{\max}$ est la plus grande valeur propre de la matrice de comparaison, et n est le nombre de critères.
   - **Rapport de cohérence (RC) :** $RC = IC/IA$, où IA est l'indice de cohérence aléatoire.
     Un RC inférieur à 0.1 est généralement acceptable. Si RC est supérieur, il est recommandé de revoir les comparaisons par paires.

Saaty a défini, par expérimentation, un ratio de cohérence comme le rapport de l'indice de cohérence calculé sur la matrice correspondant aux jugements du décideur et de l'indice aléatoire (IA) d'une matrice de même dimension.

N=nombre de critères	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IA	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Tableau 3.6 – Tableau des valeurs de l'Indice d'Incohérence (IA) en fonction du nombre de critères

10. **Étape 9 : Sélectionner le fournisseur**

    - **Analyse des scores :**Le fournisseur avec le score global le plus élevé est généralement choisi.
    - **Justification :**Utiliser les scores et les poids pour justifier la décision auprès des parties prenantes.

3.4.5.2 Avantages de la méthode AHP [21] :

1. **Structuration de la décision** : La méthode AHP permet de structurer les problèmes complexes de décision en une hiérarchie simple et compréhensible. Cela aide à clarifier les objectifs, les critères et les alternatives.
2. **Prise en compte des critères multiples** : AHP permet de prendre en compte plusieurs critères de décision, qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs, et de les évaluer de manière systématique.
3. **Comparaisons par paires** : Cette méthode permet de comparer les critères et les alternatives deux par deux, ce qui est plus facile et souvent plus précis que de les évaluer tous en même temps.
4. **Attribution de poids relatifs** : Les poids des critères sont déterminés de manière analytique, ce qui reflète mieux l'importance relative de chaque critère dans le processus de décision.
5. **Cohérence des jugements** : L'AHP inclut une vérification de la cohérence des comparaisons par paires, ce qui aide à identifier et corriger les incohérences dans les jugements des décideurs.
6. **Flexibilité** : La méthode peut être appliquée à un large éventail de décisions, qu'elles soient stratégiques, tactiques ou opérationnelles, et dans divers domaines (gestion de projets, sélection de fournisseurs, évaluation de risques, etc.).
7. **Transparence et justification** : Les décisions prises à l'aide de l'AHP sont bien documentées et justifiées, ce qui facilite la communication et la validation des décisions auprès des parties prenantes.

3.4.5.3 Limites de la méthode AHP :

1. **Complexité et temps nécessaire** : La méthode peut devenir complexe et consommatrice de temps, surtout lorsque le nombre de critères et d'alternatives est élevé.

2. **Subjectivité** : Les jugements dans les comparaisons par paires sont subjectifs et peuvent introduire des biais, même si la méthode aide à structurer et à vérifier ces jugements.
3. **Sensibilité aux erreurs de jugement** : Des erreurs ou des incohérences dans les jugements de comparaison par paires peuvent affecter significativement les résultats.
4. **Dépendance des résultats des jugements initiaux** : Les résultats de l'analyse peuvent être très sensibles aux jugements initiaux et aux poids attribués aux critères, ce qui peut nécessiter des analyses de sensibilité pour assurer la performance des décisions.
5. **Difficulté à gérer un grand nombre d'alternatives** : Comparer un grand nombre d'alternatives par paires peut devenir impraticable, et la méthode peut nécessiter des simplifications ou des regroupements.
6. **Problèmes d'échelle** : Les échelles de jugement utilisées dans AHP (par exemple, l'échelle de Saaty de 1 à 9) peuvent ne pas toujours capturer correctement l'importance relative entre les critères ou les alternatives.
7. **Arbitraire dans la normalisation des critères** : La nécessité de normaliser les critères pour les rendre comparables peut introduire une certaine arbitraire et affecter les résultats de l'analyse.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les outils et concepts essentiels utilisés pour développer les algorithmes d'optimisation intégrés à notre système ERP. En explorant la théorie des graphes, nous avons posé les bases pour modéliser et résoudre des problèmes de réseaux complexes. L'optimisation combinatoire a été abordée pour illustrer les techniques de résolution de problèmes de planification et d'allocation de ressources, incluant l'utilisation d'algorithmes avancés. Enfin, l'optimisation multi-objectif et l'analyse multicritères ont montré comment prendre des décisions en équilibrant divers critères et objectifs. Ces outils de la recherche opérationnelle sont cruciaux pour améliorer l'efficacité et la performance de notre ERP, en optimisant les processus et en facilitant la prise de décision.

Chapitre 4

Partie pratique

4.1 Introduction

Cette partie pratique marque le passage de la théorie à la réalisation concrète de notre système ERP pour EL KENDI. Elle se divise en trois phases essentielles : la conception, la réalisation et l'implémentation.

La phase de conception, basée sur les diagrammes UML, vise à établir une représentation claire et structurée du système. Elle servira de guide pour les étapes suivantes du projet.

La réalisation comprend la description de l'architecture choisie, l'analyse fonctionnelle détaillée, et le développement d'algorithmes d'optimisation. Cette phase inclut également le choix des technologies et frameworks, éléments cruciaux pour la performance et la fiabilité de notre solution.

Enfin, l'implémentation concrétise notre travail en une application fonctionnelle, prête à répondre aux besoins spécifiques d'EL KENDI.

Cette partie pratique illustrera comment nous avons transformé les concepts et les exigences identifiés précédemment en une solution ERP adaptée et efficace pour EL KENDI.

4.2 Conception :

4.2.1 Langage UML :

L'UML (Unified Modeling Language ou Langage de modélisation unifié) est un langage visuel standardisé permettant de représenter graphiquement les différents aspects d'un système informatique. Il s'agit de la norme de référence pour la modélisation orientée objet, une approche qui consiste à décomposer un système en entités logicielles abstraites appelées "objets", représentant des concepts du monde réel ou virtuel (bâtiments, ingrédients, personnes, logos, organes, temps, prix, compétences, etc.).
Ce langage fournit un ensemble de diagrammes pour visualiser et décrire la structure et le comportement des objets au sein d'un système. Cette représentation graphique facilite la compréhension de systèmes logiciels complexes par rapport à du code source brut. Bien que principalement utilisé en développement logiciel, l'UML trouve aussi des applications dans d'autres domaines comme l'industrie (modélisation des flux de processus), l'ingénierie ou le marketing.

L'UML définit 14 types de diagrammes divisés en deux catégories.

1. **Les diagrammes de structure représentent les éléments du système, leurs propriétés et leurs relations entre eux :**
   - Diagramme de classes ;
   - Diagramme d'objets ;
   - Diagramme de composants ;
   - Diagramme de structure composite ;
   - Diagramme d'ensemble ;
   - Diagramme de déploiement ;
   - Diagramme de profil.
2. **Les diagrammes de comportement représentent les processus et les interactions entre les objets :**
   - Diagramme de cas d'utilisation ;
   - Diagramme d'activité :
   - Diagramme d'état-transition ;
   - Diagramme de séquence ;
   - Diagramme de communication ;
   - Diagramme de temps ;
   - Diagramme d'aperçu d'interaction.

4.2.2 Identification des acteurs :

1. **Administrateur Système (Admin)**
   - Gestion des utilisateurs.
   - Configuration des paramètres du système.
   - Maintenance et mise à jour du système.
2. **Utilisateur Authentifié (User)**
   - Utilisation des fonctionnalités communes.
   - Accès aux informations et rapports.

Module	Acteur	Cas d'utilisation
Gestion des Achats	Responsable des Achats (User)	Création et gestion des commandes d'achat
	User (en général)	• Consultation des états de commande et des rapports d'achat
Module de Transport	Responsable Logistique (User)	• Planification des expéditions • Suivi des livraisons • Coordination avec les transporteurs
	User (en général)	Consultation des états de livraison et des rapports logistiques.
Gestion d'Entrepôt (Warehouse Management)	Responsable d'Entrepôt (User)	• Gestion des stocks • Organisation de l'entrepôt • Supervision des entrées et sorties de marchandises
	Magasinier (User)	• Réception et stockage des marchandises • Préparation des commandes • Inventaire des stocks
	User (en général)	Consultation des états de stock et des rapports d'entrepôt
Gestion de Production	Responsable de Production (User)	• Planification des productions • Suivi des performances de production • Gestion des ressources de production
	Opérateur de Production (User)	• Exécution des ordres de production • Signalement des anomalies • Suivi des instructions de production
	Planificateur de Production (User)	• Création des plannings de production • Allocation des ressources • Coordination avec les autres départements

Tableau 4.1 – Modules, Acteurs et Cas d'utilisation

4.2.3 Module Achat & approvisionnement :

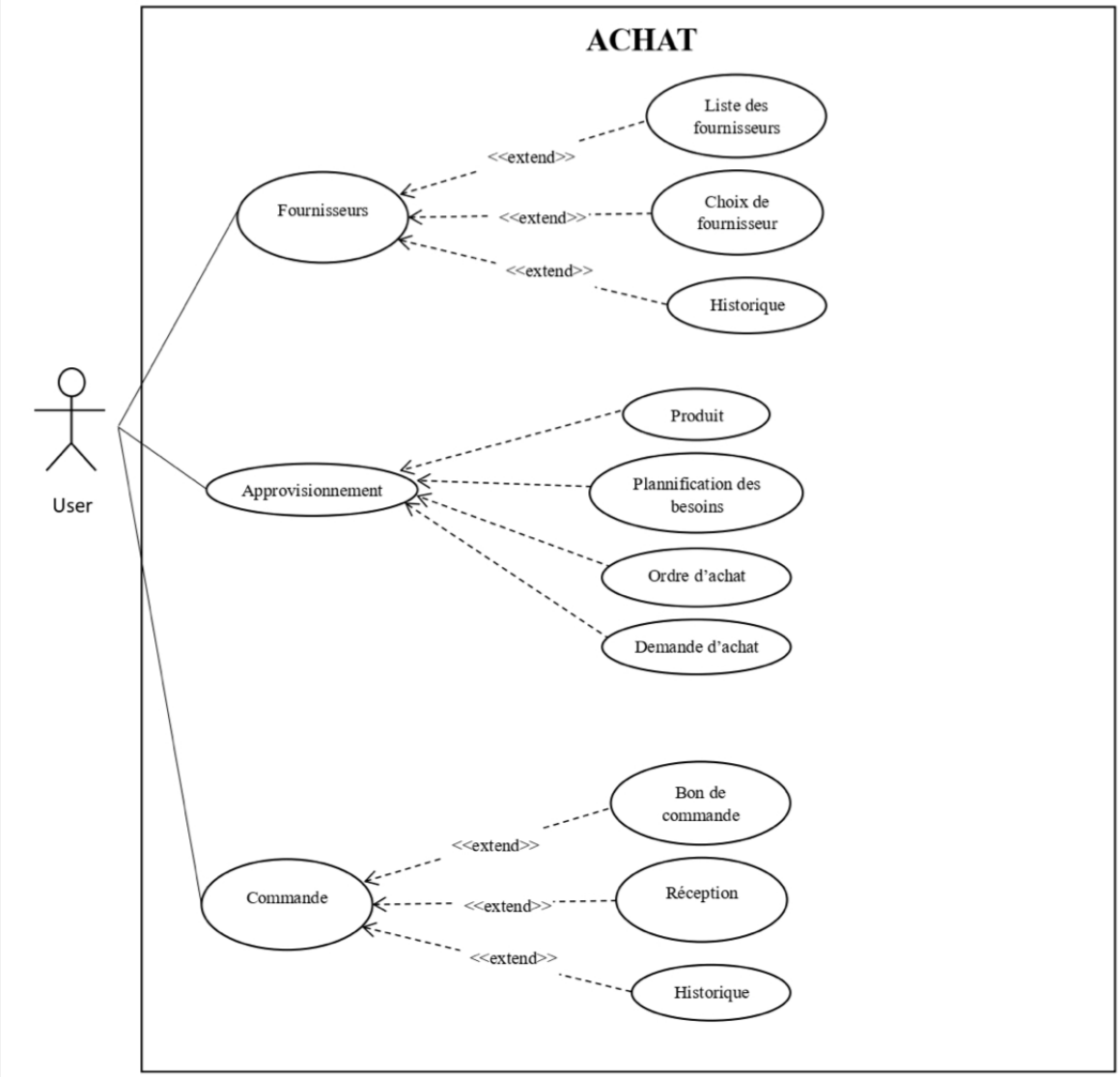


FIGURE 4.1 – Diagrame USE-Case du Module Achat

4.2.4 TMS :

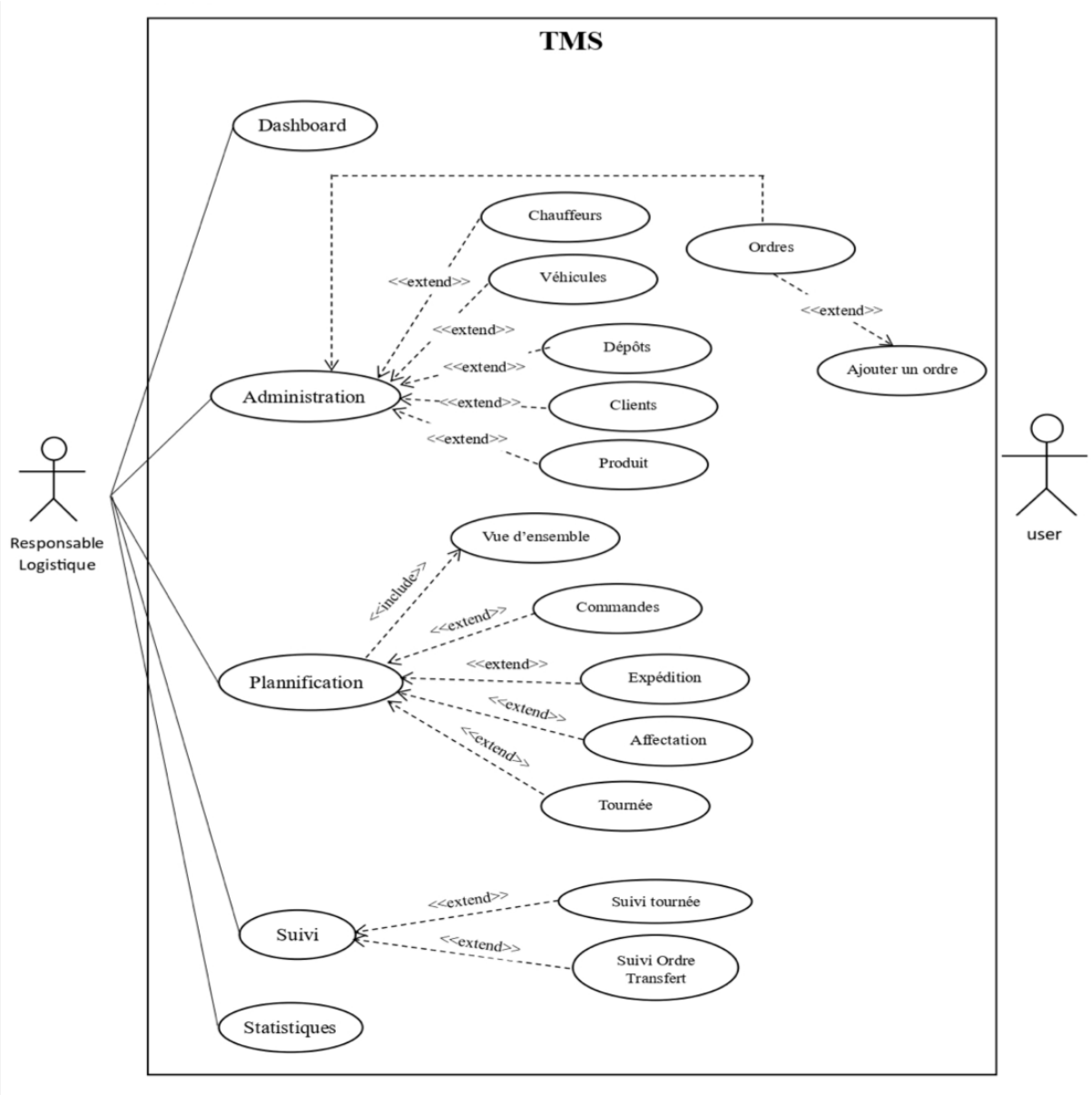


FIGURE 4.2 – Diagrame USE-Case du Module TMS

4.2.5 WMS :

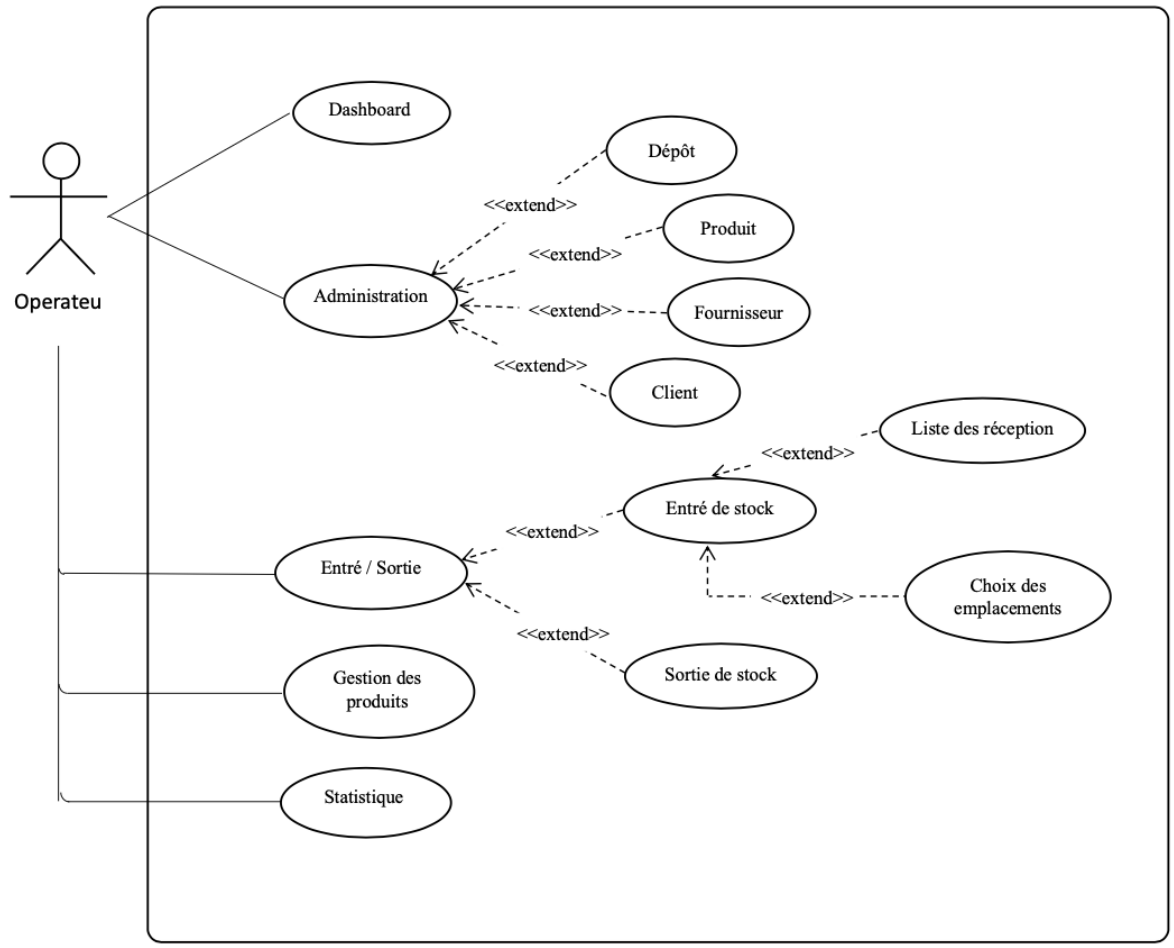


FIGURE 4.3 – Diagrame USE-Case du Module WMS

4.2.6 Production :

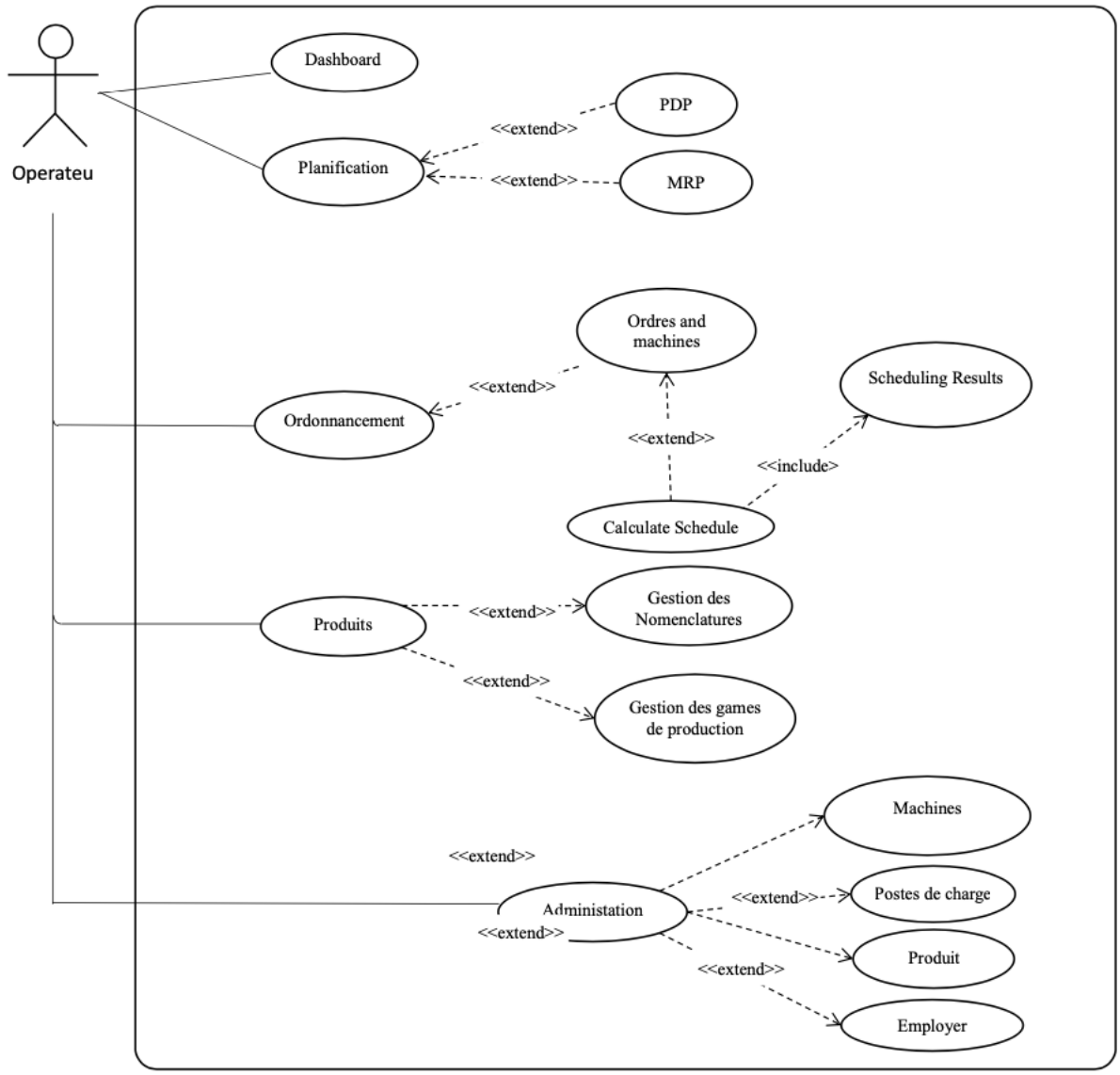


FIGURE 4.4 – Diagrame USE-Case du Module Production

4.2.7 Diagramme Entité - Relation (ERD)

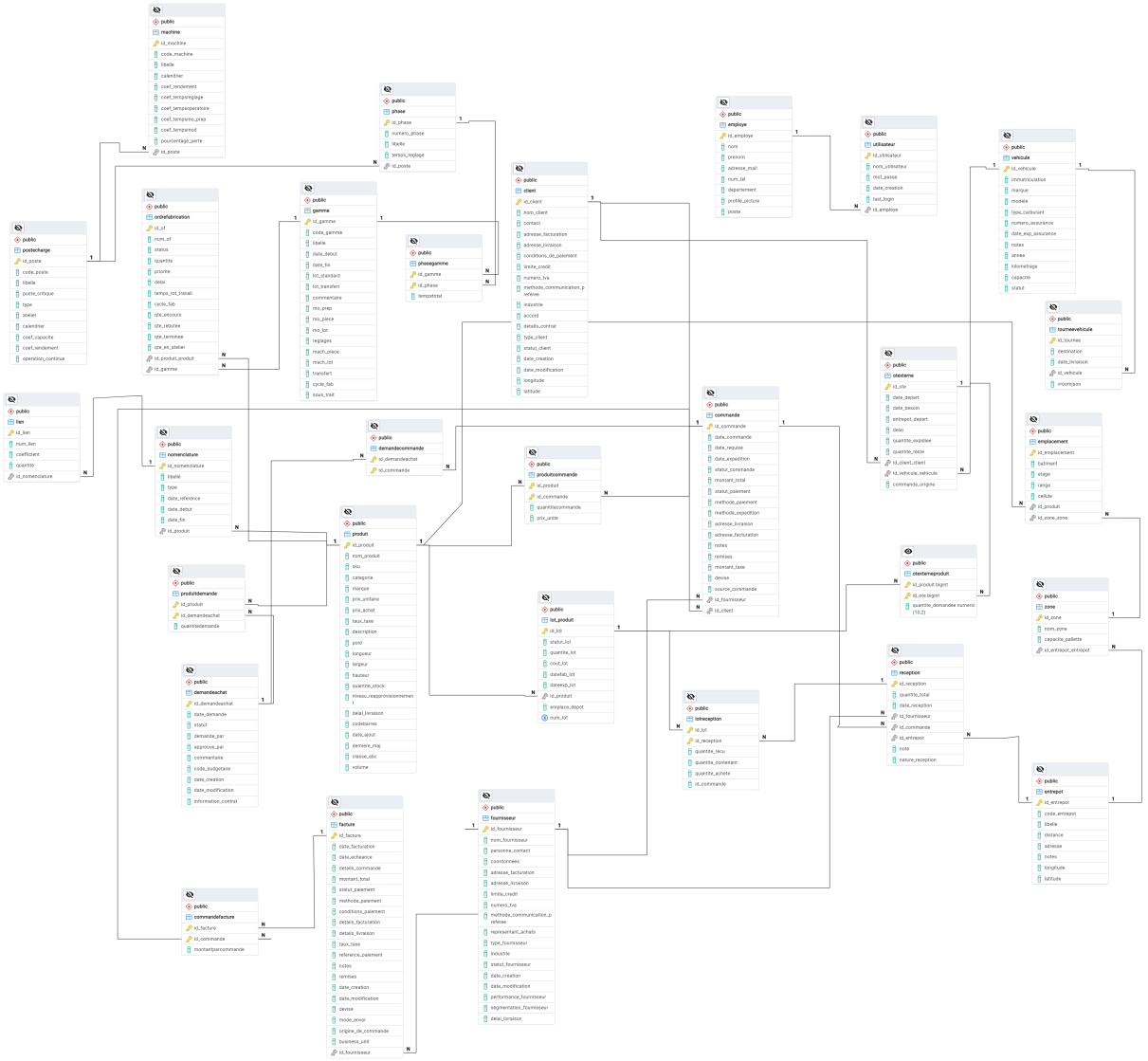


FIGURE 4.5 – Diagrame ERD

4.3 Réalisation :

4.3.1 Environnement de développement (technologies et Frameworks) ;

4.3.1.1 PostgreSQL :

Dans le cadre de notre projet de conception d'un système ERP, nous avons choisi PostgreSQL comme système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR). Ce choix repose sur plusieurs facteurs clés, notamment la stabilité, la fiabilité et la conformité aux standards SQL de PostgreSQL.

FIGURE 4.6 – Logo de PstgreSQL

En tant que solution open source, PostgreSQL bénéficie d'une communauté active de développeurs qui contribuent régulièrement à son amélioration et à son évolution. Cette caractéristique assure une maintenance régulière et l'ajout de nouvelles fonctionnalités au fil du temps.
PostgreSQL se distingue par sa compatibilité avec les propriétés ACID (Atomicité, Cohérence, Isolation, Durabilité), garantissant ainsi des transactions fiables et cohérentes. Cette capacité est essentielle pour notre système ERP, qui doit gérer des données critiques de manière sécurisée et intègre.
De plus, PostgreSQL offre un support avancé pour le langage SQL, permettant l'exécution de requêtes complexes, de jointures et de sous-requêtes. Cette flexibilité s'avère particulièrement utile pour notre projet, qui nécessite une gestion efficace des données relationnelles.
Afin de faciliter l'administration et la gestion de notre base de données PostgreSQL, nous avons opté pour l'utilisation de pgAdmin. Cet outil fournit une interface graphique conviviale qui simplifie les tâches de création, de modification et de suppression des bases de données, des tables, des vues et des fonctions.
L'éditeur de requêtes intégré à pgAdmin nous permet d'écrire et d'exécuter des requêtes SQL de manière plus intuitive, tandis que les outils de diagnostic et de monitoring offrent des informations précieuses sur les performances et les statistiques de notre base de données.
Grâce à ces fonctionnalités, PostgreSQL et pgAdmin constituent un environnement complet et performant pour la gestion de notre base de données, assurant une intégration harmonieuse avec le reste de notre solution ERP.

4.3.1.2 Java :

Java est un langage de programmation populaire et polyvalent qui a été largement adopté dans l'industrie du logiciel. Dans le cadre de notre projet ERP, nous avons choisi

Java comme principal langage de programmation, en raison de ses nombreux avantages et de sa pertinence pour le développement d'applications d'entreprise complexes.

FIGURE 4.7 – Logo Java

Tout d'abord, Java est un langage orienté objet, ce qui facilite la modularité, la réutilisabilité et la maintenance du code. Cette approche s'aligne parfaitement avec les principes de conception d'un ERP, qui nécessite une architecture flexible et extensible pour répondre aux besoins évolutifs de l'entreprise. Ensuite, Java est reconnu pour sa portabilité et son indépendance vis-à-vis des plateformes. Grâce à la machine virtuelle Java (JVM), le même code peut être exécuté sur différents systèmes d'exploitation sans nécessiter de modifications majeures. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse pour notre solution ERP, qui doit être déployée sur diverses infrastructures au sein de l'entreprise.

De plus, Java bénéficie d'un vaste écosystème de bibliothèques et de frameworks open source, tels que Spring, Hibernate et JavaFX. Ces ressources nous ont permis d'accélérer le développement de notre application, en nous évitant de repartir de zéro pour certaines fonctionnalités courantes. Un autre atout majeur de J
ava est sa sécurité renforcée. Grâce à des mécanismes tels que le chargement de classes sécurisé et la gestion de la mémoire automatique, Java offre une protection contre les erreurs de programmation courantes et les failles de sécurité potentielles, ce qui est essentiel pour une application de gestion d'entreprise manipulant des données sensibles.

Enfin, Java est soutenu par une vaste communauté de développeurs et dispose de nombreuses ressources d'apprentissage et d'outils de développement de haute qualité. Cet écosystème riche et dynamique facilite la formation de nouveaux développeurs, le partage de connaissances et l'adoption de bonnes pratiques de codage.

En choisissant Java comme langage principal pour notre projet ERP, nous avons pu bénéficier d'un environnement de développement mature, performant et sécurisé, tout en tirant parti des avantages d'un langage orienté objet polyvalent et portable. Cette décision nous a permis de créer une solution effcace et évolutive, capable de répondre aux exigences complexes de la gestion d'entreprise.

4.3.1.3 JavaFX, Scene Builder, CSS

Pour la conception de l'interface utilisateur (front-end) de notre ERP, nous avons utilisé JavaFX en tant que langage principal et Scene Builder comme outil interactif de conception graphique. JavaFX est un langage de script déclaratif et statiquement typé, offrant des fonctionnalités de première classe, une syntaxe déclarative, des compréhensions de listes et une évaluation incrémentale basée sur les dépendances. Il est particulièrement adapté pour créer des interfaces utilisateur riches et interactives.

4.3.1.4 II.1.3.1. Utilisation de JavaFX et Scene Builder :

JavaFX Scene Builder a été un outil essentiel dans notre processus de développement. Cet environnement de mise en page visuel permet de concevoir rapidement des interfaces utilisateur pour des applications JavaFX sans avoir à écrire de code. Grâce à une interface simple et intuitive, Scene Builder permet de positionner les composants de l'interface utilisateur graphique (IUG) sur une scène JavaFX par simple glisser-déposer. Au fur et à mesure de la construction de la disposition de l'interface utilisateur, le code FXML correspondant est automatiquement généré. Cela facilite la création rapide de prototypes interactifs et permet même aux non-programmeurs de participer à la conception de l'interface.

4.3.1.5 Stylisation avec CSS pour JavaFX

Pour améliorer l'apparence de notre application, nous avons utilisé CSS pour JavaFX afin de styliser les composants d'interface utilisateur. Bien que similaire au CSS utilisé pour le web, le CSS de JavaFX a des propriétés spécifiques adaptées aux composants JavaFX. CSS (Cascading Style Sheets) permet de décrire la présentation d'un document écrit en HTML ou XML (y compris SVG, MathML ou XHTML). Dans le contexte de JavaFX, CSS décrit la façon dont les éléments de l'interface doivent être affichés à l'écran.

4.3.1.6 VROOM - Vehicle Routing Open-source Optimization Machine

Dans le cadre du développement du module de gestion du transport de notre projet ERP, nous avons intégré VROOM, un outil open source conçu pour résoudre les problèmes de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problems - VRP). Ce choix nous a permis de bénéficier d'une solution rapide et flexible pour optimiser efficacement les itinéraires de notre flotte de véhicules.
VROOM offre une gamme étendue de fonctionnalités adaptées à notre besoin d'optimisation des tournées. Il prend en compte diverses contraintes telles que les fenêtres de temps, les capacités de chargement des véhicules, ainsi que des contraintes personnalisées spécifiques à notre activité. L'un des atouts majeurs de VROOM réside dans ses performances élevées et sa capacité à traiter des problèmes de grande envergure. Grâce à des algorithmes optimisés, il nous permet de résoudre rapidement et efficacement les problèmes de tournées complexes impliquant un grand nombre de points de livraison et de véhicules.

De plus, VROOM s'intègre parfaitement avec les données d'OpenStreetMap, assurant ainsi des calculs d'itinéraires précis et fiables. Cette fonctionnalité s'avère importante pour notre module de gestion du transport, où la prise en compte des distances et des temps de parcours réels est essentielle. L'outil propose également une API REST conviviale, facilitant son intégration avec les autres composants de notre système ERP. Cela nous a permis de créer une solution cohérente et interconnectée, où les données relatives aux tournées sont partagées de manière transparente avec les autres modules, tels que la gestion des stocks ou la planification de la production.

Enfin, en tant que projet open source sous licence MIT, VROOM nous offre la liberté de l'utiliser, de le modifier et de l'adapter à nos besoins spécifiques, sans contraintes de licence ou de coûts supplémentaires. L'intégration de VROOM dans notre module de

gestion du transport a considérablement amélioré l'efficacité de nos opérations logistiques, en optimisant les tournées de nos véhicules et en réduisant les coûts associés. Cet outil s'est avéré être un choix judicieux, nous permettant de proposer une solution ERP performante et compétitive sur le marché.

4.3.1.7 OpenStreetMap (OSM)

OpenStreetMap (OSM) est un projet collaboratif open source visant à créer une carte libre et modifiable du monde entier. J'ai choisi d'intégrer OSM dans mon projet ERP pour plusieurs raisons clés.

Tout d'abord, OSM se distingue par sa riche base de données cartographiques, alimentée par des millions de contributeurs bénévoles à travers le monde. Cette ressource précieuse et continuellement mise à jour nous fournit un accès à des données géographiques détaillées, comprenant des informations sur les rues, les bâtiments, les parcs et bien d'autres éléments. Ensuite, en tant que projet open source, OSM nous offre la liberté d'utiliser et de partager ces données cartographiques sans aucune restriction. Cette flexibilité nous a permis d'intégrer facilement ces données dans notre solution ERP, sans avoir à nous soucier de coûts de licence ou de limitations d'utilisation.

De plus, OSM propose une gamme d'outils et de bibliothèques open source qui facilitent l'intégration de ses données dans diverses applications et sites web. Grâce à ces ressources, nous avons pu rapidement développer des fonctionnalités cartographiques avancées pour notre module de gestion du transport, telles que l'affichage des itinéraires optimisés, la visualisation des emplacements des entrepôts et des points de livraison, ainsi que la gestion des informations géographiques associées.

Enfin, la nature collaborative d'OSM garantit une mise à jour constante et une précision accrue des données cartographiques. Grâce à la contribution continue de la communauté, nous pouvons être assurés que notre module de gestion du transport utilise des informations à jour et fiables, ce qui est essentiel pour une planification efficace des tournées et une prise de décision éclairée. En intégrant OpenStreetMap dans notre projet ERP, nous avons pu tirer parti d'une ressource cartographique riche, open source et constamment améliorée, tout en bénéficiant d'une flexibilité et d'une liberté d'utilisation inégalées. Cette décision nous a permis de proposer une solution logistique performante et adaptée aux besoins de nos clients.

4.3.1.8 JMetal

Dans notre projet d'ERP, nous avons choisi jMetal comme bibliothèque pour développer notre algorithme d'optimisation. jMetal, ou "Metaheuristic Algorithms in Java", est un framework open source Java dédié à l'optimisation multi-objectif basée sur les métaheuristiques.
Ce choix s'est imposé pour plusieurs raisons : sa gratuité, sa compatibilité avec notre environnement Java, sa riche bibliothèque d'algorithmes incluant NSGA-II que nous avons utilisé, son architecture modulaire permettant une personnalisation aisée, et le soutien de sa communauté active. Ces caractéristiques ont grandement facilité l'implémentation d'une solution d'optimisation adaptée aux besoins spécifiques de notre ERP.

4.3.2 Architecture :

Une architecture bien définie est essentielle pour le développement d'un système ERP complet et performant. Elle permet d'assurer la scalabilité, la maintenabilité, la performance, la sécurité, la fiabilité et l'intégrité des données du système. Une architecture solide guide efficacement la conception et l'implémentation, en abordant dès le départ des aspects cruciaux tels que la modularité, la gestion des ressources, l'authentification, la tolérance aux pannes et la cohérence des données. C'est pourquoi notre équipe a accordé une attention particulière à la définition d'une architecture robuste pour notre solution ERP.

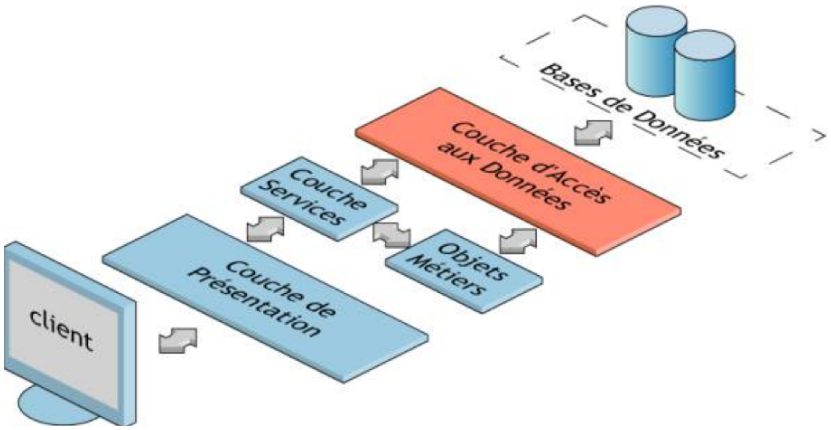


FIGURE 4.8 – Architecture en Couche du logiciel

Le système, conçu comme une application desktop basée sur site, utilise Java avec JavaFX pour l'interface utilisateur, CSS pour le style, et PostgreSQL pour la base de données. Voici une vue d'ensemble de cette architecture :

4.3.2.1 Couche de Présentation :

La couche de présentation est l'interface utilisateur (IU) du système ERP. Elle permet aux utilisateurs finaux d'interagir avec le système de manière intuitive et efficace. Développée en JavaFX, cette couche offre une interface graphique riche et interactive, facilitant ainsi la gestion des diverses opérations logistiques au sein de l'entreprise.

- **Interface Graphique Utilisateur (GUI)**
  JavaFX, en tant que technologie principale utilisée pour développer l'IU, permet de créer des interfaces visuellement attrayantes et hautement interactives. Elle offre un ensemble de contrôles et de composants graphiques sophistiqués tels que des tableaux, des graphiques, des boutons, des champs de texte, des menus déroulants, etc.

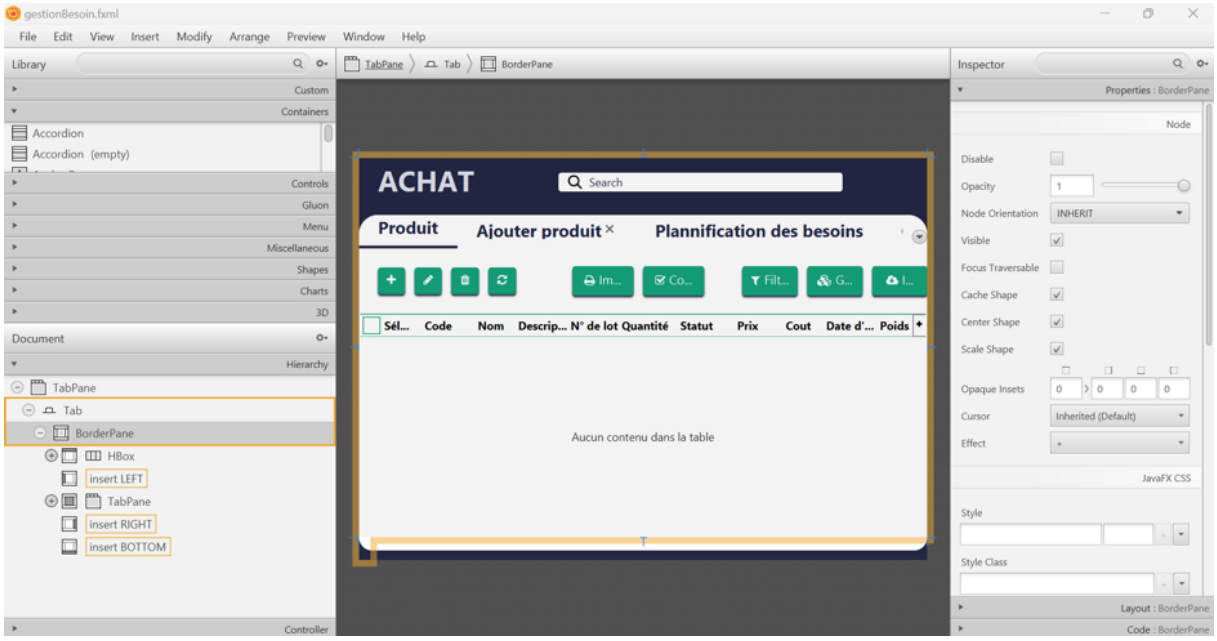


FIGURE 4.9 – Fenêtre SceneBuilder

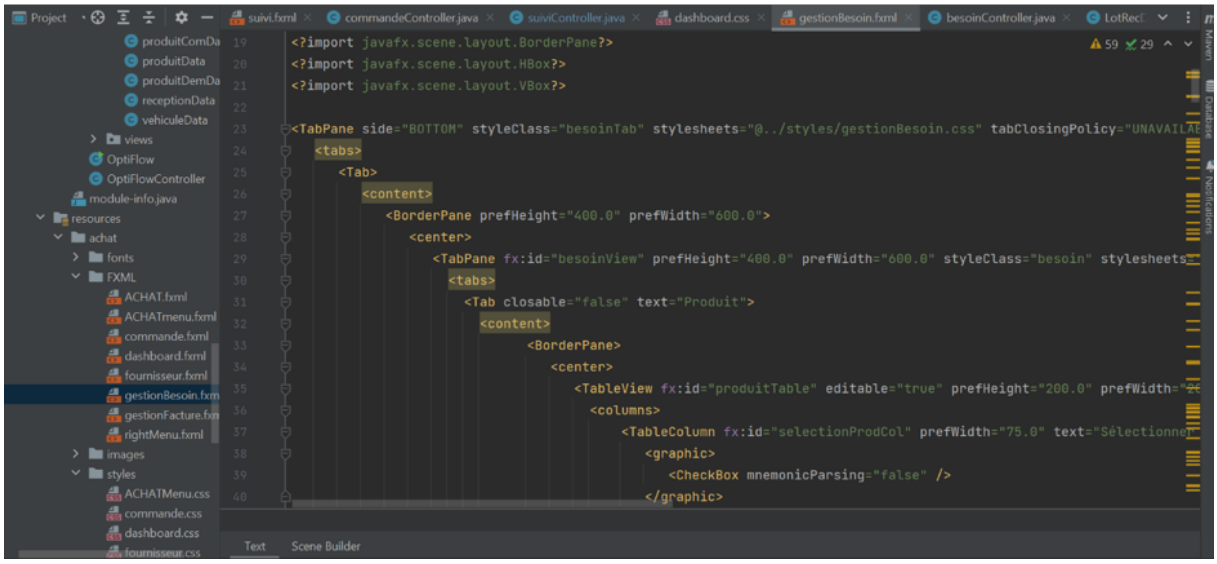


FIGURE 4.10 – Fichier fxml

- **Personnalisation avec CSS**
  L'utilisation de CSS permet de styliser les composants de l'interface de manière flexible et uniforme, assurant une cohérence visuelle à travers toute l'application. Les styles CSS facilitent également l'adaptation de l'interface aux préférences et besoins spécifiques des utilisateurs.

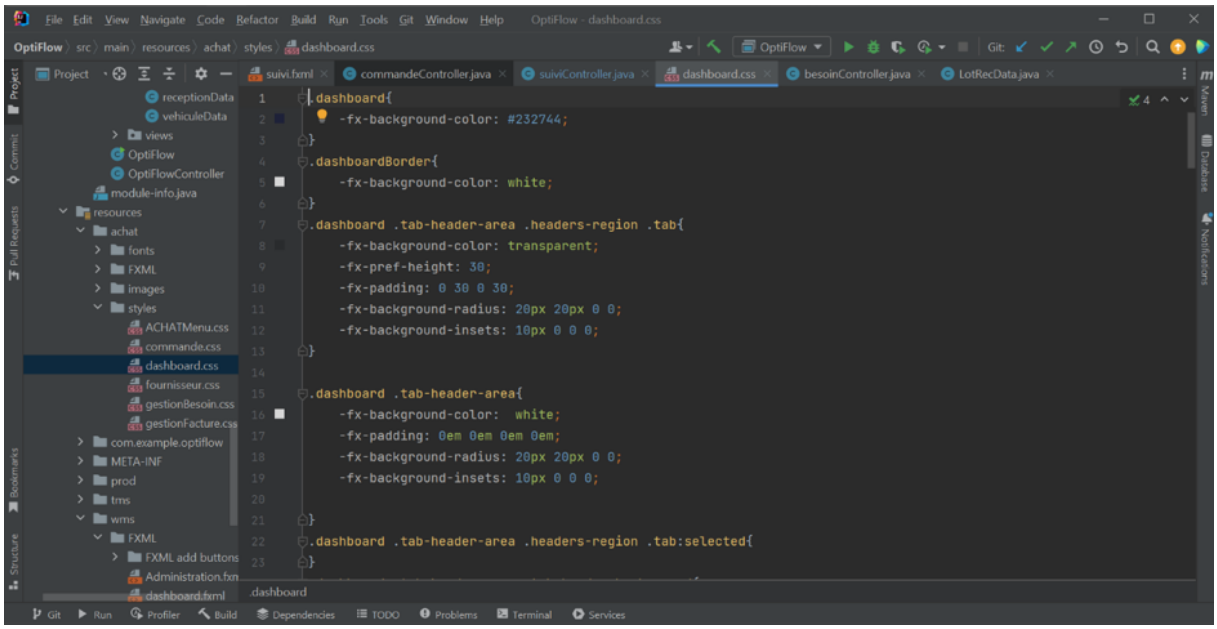


FIGURE 4.11 – Fichier Css

4.3.2.2 Couche de Logique Métier :

La couche de logique métier est le cœur du système ERP. Elle encapsule toutes les règles et processus métier nécessaires pour gérer efficacement les opérations logistiques de l'entreprise. Cette couche assure la gestion des transactions complexes, maintient l'intégrité des données et applique les règles spécifiques à chaque module.
Le langage Java est utilisé pour implémenter les règles métiers et les processus. La fiabilité et la portabilité de Java en font un choix idéal pour des applications d'entreprise de grande envergure comme un ERP.

Fonctionnalités :

- **Gestion des Règles Métier :** La couche de logique métier est responsable de l'application des règles et des politiques de l'entreprise. Cela inclut des règles de validation des données, des calculs spécifiques, et des logiques conditionnelles qui déterminent le comportement du système en fonction des entrées utilisateur et des états de données.
- **Coordination des Processus :** Cette couche coordonne les divers processus métiers entre les modules. Par exemple, elle gère le flux de travail depuis la réception d'une commande, en passant par la production, jusqu'à la gestion des stocks et l'expédition finale.

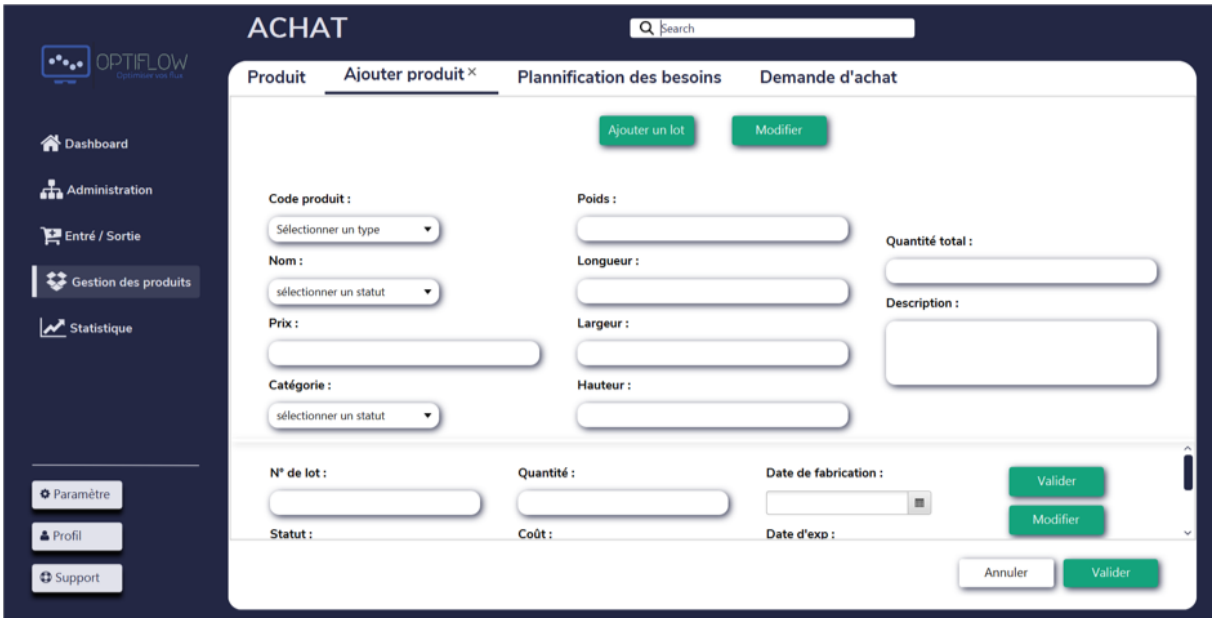


FIGURE 4.12 – Module Achat

FIGURE 4.13 – Module Production

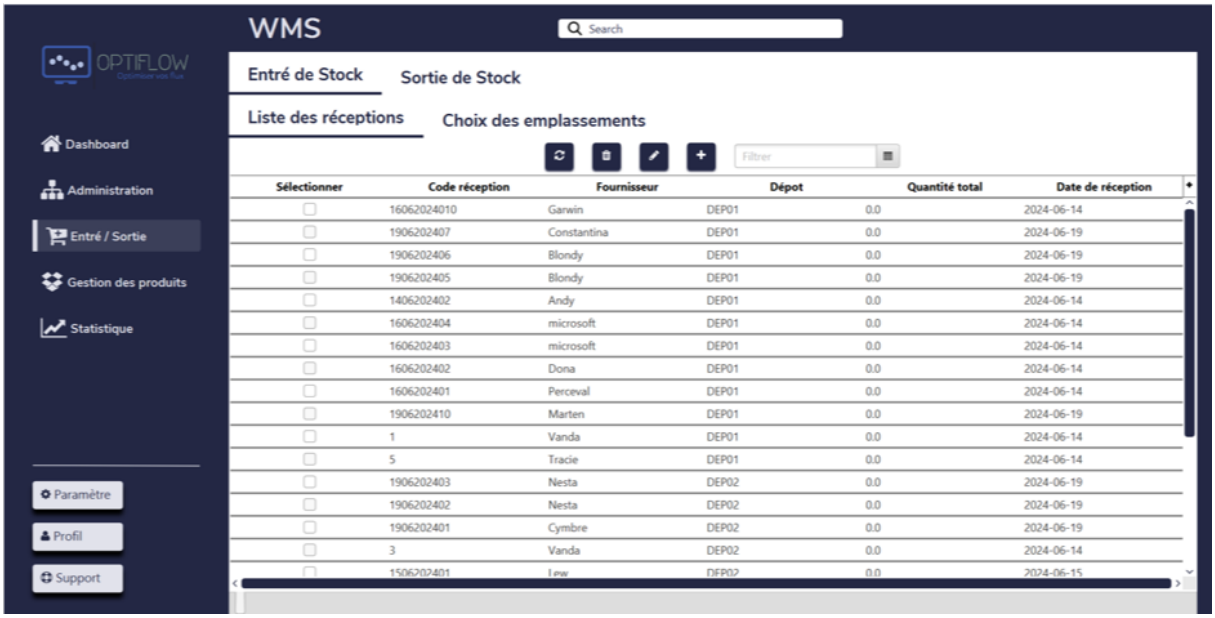


FIGURE 4.14 – Module WMS

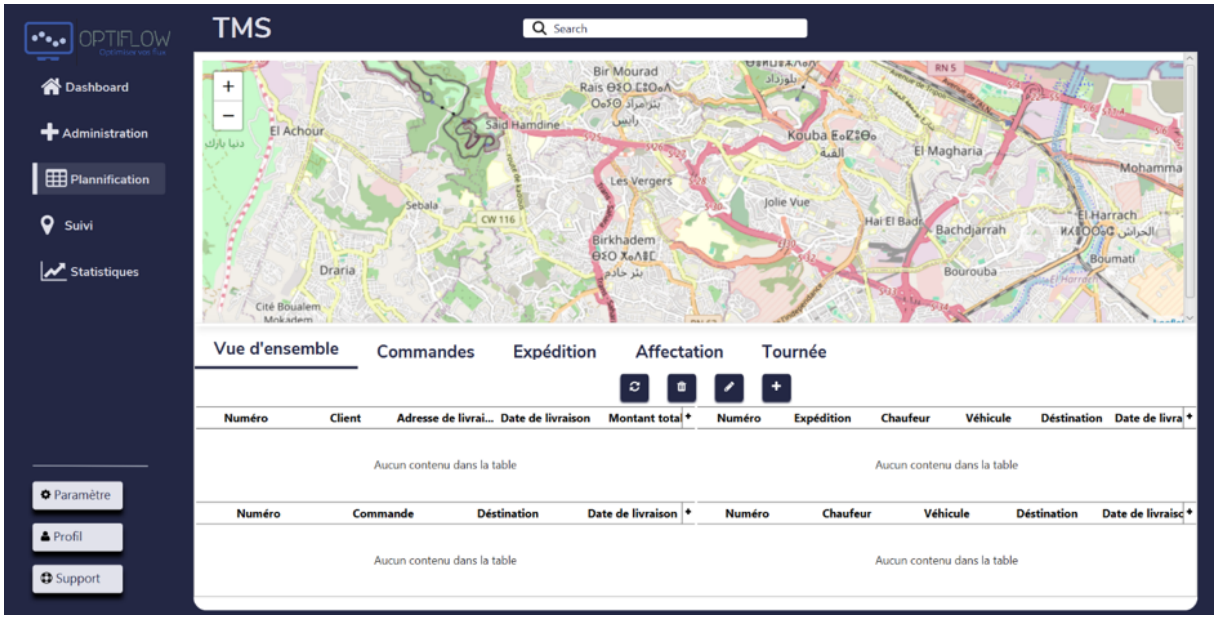


FIGURE 4.15 – Module TMS

- **Interactions entre Modules :**
  - **Module Achat :** La logique métier gère les processus d'approvisionnement, y compris la gestion des fournisseurs, la création et le suivi des commandes d'achat, et la réception des marchandises. Ce module est en relation avec le module entrepôt. Les commandes effectuées par le module achat apparaissent dans la fenêtre de réception du module entrepôt. Il suffit de sélectionner le code de commande, et les attributs sont automatiquement importés.
  - **Module Production :** Ce module gère la planification et l'exécution de la production, en s'assurant que les matières premières nécessaires sont disponibles

et en coordonnant les activités de fabrication. Dès qu'un ordre de fabrication (OF) est lancé, la matière première en stock est automatiquement déduite.

- **Module Entrepôt :** La logique métier s'occupe de la gestion des stocks, incluant l'inventaire, le réapprovisionnement et l'optimisation de l'espace de stockage. Lorsqu'une sortie ou un transfert externe est programmé, une expédition est générée dans le module transport.
- **Module Transport :** Ce module coordonne les expéditions et les livraisons, en optimisant les itinéraires et en gérant les transporteurs ainsi que les coûts logistiques.

4.3.2.3 Couche d'Accès aux Données :

La couche d'accès aux données est une composante essentielle du système ERP, responsable de l'interaction entre l'application et la base de données. Cette couche assure la communication avec la base de données PostgreSQL, exécutant des requêtes SQL et gérant les transactions de données.

Fonctionnalités :

- **Communication avec la Base de Données :** La couche d'accès aux données est chargée d'établir et de maintenir la connexion avec la base de données PostgreSQL. Elle envoie des requêtes SQL pour lire, écrire, mettre à jour et supprimer des données.
- **Gestion des Transactions :** Cette couche gère les transactions, garantissant que les opérations de modification des données sont atomiques, cohérentes, isolées et durables. Cela assure l'intégrité et la fiabilité des données, même en cas de défaillance du système.
- **JDBC (Java Database Connectivity) :** JDBC est utilisé pour interagir avec la base de données PostgreSQL. Il fournit une API permettant d'exécuter des requêtes SQL et de traiter les résultats.
- **ORM (Object-Relational Mapping) :** Hibernate, un ORM populaire, est utilisé pour simplifier les opérations sur les données. Il permet de mapper les objets Java aux tables de la base de données, facilitant ainsi la gestion des données sans écrire de requêtes SQL complexes.
- **Requêtes SQL :** La couche d'accès aux données exécute des requêtes SQL pour récupérer des données, telles que les informations sur les commandes, les stocks, les fournisseurs, etc.

4.3.2.4 Couche de Données :

La couche de données est l'endroit où toutes les informations du système ERP sont stockées et gérées. Elle sert de fondation pour les autres couches du système en offrant un stockage sécurisé et structuré des données essentielles aux opérations de l'entreprise. Les données sont organisées de manière structurée, généralement sous forme de tables dans une base de données relationnelle, facilitant l'accès, la manipulation et la gestion des données. PostgreSQL est utilisé comme système de gestion de base de données (SGBD) pour cette couche.

4.3.3 Analyse Fonctionnel des modules :

Module Achat

Type de Fonction	Fonction	Détail
Fonctions Principales (FP)	FP1 : Gestion des achats	Contrôle des approvisionnements, gestion des commandes d'achat et de leurs réceptions
	FP2 : Optimisation des coûts	Sélection des fournisseurs et négociation des prix
Fonctions Secondaires (FS)	FS1 : Surveillance des stocks	Suivi en temps réel des niveaux de stock
	FS2 : Suivi des commandes	Gestion des commandes d'achat en cours
	FS3 : Gestion des commandes	Administration des différents types de commandes, réceptions et factures
	FS4 : Évaluation et sélection des fournisseurs	Évaluation et sélection optimale des fournisseurs
Contraintes (C)	C1 : Intégration ERP	Intégration avec les autres modules de l'ERP (notamment production et Warehouse)
	C2 : Précision des données	Précision et mise à jour en temps réel des données de stock
	C3 : Sécurité des données	Sécurité des données, notamment pour les informations sensibles sur les fournisseurs et les prix
	C4 : Flexibilité des processus	Flexibilité pour gérer différents types de commandes et de processus d'approvisionnement
	C5 : Gestion du volume de données	Capacité à gérer un grand volume de données et de transactions

Tableau 4.2 – Analyse fonctionnel du module Achat

Module Production

Type de Fonction	Fonction	Détail
Fonctions Principales (FP)	FP1 : Planification et Ordonnancement	Planification et ordonnancement de la production
	FP2 : Calcul des Besoins	Calcul des besoins et plan industriel et commercial
	FP3 : Contrôle et Suivi	Contrôle et suivi de la fabrication
	FP4 : Gestion des Nomenclatures	Gestion des nomenclatures et des ressources
Fonctions Secondaires (FS)	FS1 : Génération du plan directeur	Génération du plan directeur de production
	FS2 : Plan d'approvisionnement optimisé	Génération du plan d'approvisionnement optimisé
	FS3 : Anticipation des besoins	Anticipation des besoins en ressources à long terme
	FS4 : Optimisation des machines	Optimisation de l'utilisation des machines et équilibrage de la charge de travail
	FS5 : Structure de produit	Définition de la structure et composition de chaque produit
	FS6 : Description des étapes	Description des étapes et opérations de fabrication
Contraintes (C)	C1 : Intégration ERP	Intégration avec les autres modules de l'ERP (notamment Achat et Warehouse)
	C2 : Fiabilité des données	Fiabilité des données sur les capacités de production
	C3 : Précision des données	Précision et mise à jour en temps réel des données de production
	C4 : Gestion des structures complexes	Capacité à gérer des structures de produits complexes (nomenclatures multi-niveaux)

Type de Fonction	**Fonction**	**Détail**
	C5 : Performance des algorithmes	Performance des algorithmes d'optimisation pour l'équilibrage de la charge de travail
	C6 : Sécurité des données	Sécurité des données de production sensibles
	C7 : Interface utilisateur	Interface utilisateur intuitive pour la configuration et l'utilisation des différentes fonctionnalités

Tableau 4.3 – Analyse fonctionnel du module Production

Module Warehouse

Type de Fonction	Fonction	Détail
Fonctions Principales (FP)	FP1 : Optimisation de la surface	Optimisation de la surface de stockage
	FP2 : Allocation dynamique	Allocation dynamique des emplacements
	FP3 : Suivi des mouvements	Suivi des mouvements de stocks de la réception à l'expédition
Fonctions Secondaires (FS)	FS1 : Intégration des statuts	Intégration des informations sur les statuts de stock et surveillance des niveaux de stock en temps réel
	FS2 : Attribution des emplacements	Attribution automatique des emplacements de stockage
Contraintes (C)	C1 : Intégration ERP	Intégration avec les autres modules de l'ERP (notamment Production et Achat)
	C2 : Précision des données	Précision et mise à jour en temps réel des données de stock
	C3 : Flexibilité des structures	Flexibilité pour s'adapter à différentes structures d'entrepôt
	C4 : Gestion du volume de mouvements	Capacité à gérer un grand volume de mouvements et de transactions
	C5 : Performance des algorithmes	Performance des algorithmes d'optimisation pour l'allocation des emplacements
	C6 : Sécurité des données	Sécurité des données relatives aux stocks et aux mouvements

Tableau 4.4 – Analyse fonctionnel du module WMS

Module Transport

Type de Fonction	**Fonction**	**Détail**
Fonctions Principales (FP)	FP1 : Gestion des commandes	Gestion des commandes de vente et des expéditions
	FP2 : Optimisation des tournées	Optimisation des tournées de véhicules
	FP3 : Visualisation géographique	Visualisation géographique
Fonctions Secondaires (FS)	FS1 : Suivi des disponibilités	Suivi de la disponibilité des camions et des chauffeurs
	FS2 : Mise à jour des statuts	Mise à jour en temps réel des statuts de transport
	FS3 : Suivi des retards	Suivi des retards et incidents de transport
	FS4 : Gestion des capacités	Gestion des capacités de chargement des véhicules
Contraintes (C)	C1 : Intégration ERP	Intégration avec les autres modules de l'ERP (notamment Warehouse)
	C2 : Précision des données	Précision et mise à jour en temps réel des données de transport
	C3 : Performance des algorithmes	Performance des algorithmes d'optimisation pour les tournées de véhicules
	C4 : Sécurité des données	Sécurité des données relatives aux transports et aux prestataires
	C5 : Interface utilisateur	Interface utilisateur intuitive pour la visualisation des itinéraires et des statuts
	C6 : Fiabilité du suivi	Fiabilité dans le suivi en temps réel des véhicules
	C7 : Gestion des imprévus	Capacité à gérer des situations imprévues (retards, pannes, etc.)

Tableau 4.5 – Analyse fonctionnel du module TMS

4.3.4 Optimisation

4.3.4.1 Achat :

Modèle Mathématique pour AHP avec Automatisation des Comparaisons par Paires

Notations

- $A = \{A_1, A_2, \ldots, A_m\}$: Ensemble des alternatives (fournisseurs).
- $C = \{C_1, C_2, \ldots, C_n\}$: Ensemble des critères.
- v_{ik} : Valeur de l'alternative A_i pour le critère C_k.
- p_k : Pire valeur possible pour le critère C_k (fournie par l'utilisateur).
- M_{jk} : Meilleure valeur parmi les alternatives pour le critère C_k.
- $e_{ijk} = |v_{ik} - v_{jk}|$: Écart entre la valeur de l'alternative A_i et la valeur de l'alternative A_j pour le critère C_k.

Calcul des "pas"

Pour chaque critère C_k :

$$s_k = \frac{|p_k - M_{jk}|}{9}$$

Remplissage de la Matrice de Comparaison par Paires

Pour chaque critère C_k, remplir la matrice de comparaison par paires $A^{(k)}$ où chaque élément $a_{ij}^{(k)}$ est calculé en fonction du nombre de "pas" entre les alternatives A_i et A_j :

Si v_{ik} est meilleur que v_{jk}, Alors :

$$a_{ij}^{(k)} = \left\lceil \frac{e_{ijk}}{s_k} \right\rceil$$

si non

$$a_{ji}^{(k)} = \left\lceil \frac{e_{ijk}}{s_k} \right\rceil$$

Ensuite, l´etape suivante consiste a faire la normalisation de ces valeurs.

Normalisation de la Matrice et Calcul des Poids

Pour chaque matrice $A^{(k)}$:

1. Somme des colonnes :
$$S_j^{(k)} = \sum_{i=1}^{m} a_{ij}^{(k)}$$
2. Normalisation des éléments de la matrice :
$$a_{ij}^{\text{norm}(k)} = \frac{a_{ij}^{(k)}}{S_j^{(k)}}$$
3. Calcul des poids :
$$w_i^{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^{m} a_{ij}^{\text{norm}(k)}}{m}$$

Agrégation des Poids
Pour obtenir le score global W_i de chaque alternative A_i :

1. Poids des critères :
$$w_k$$
obtenus à partir de la matrice de comparaison des critères (similaire à la méthode utilisée pour les alternatives).
2. Score global :
$$W_i = \sum_{k=1}^{n} w_k \cdot w_i^{(k)}$$

Interprétation des Résultats
L'alternative avec le score global W_i le plus élevé est considérée comme la meilleure option parmi les fournisseurs.

Problème de Choix de Fournisseur

Les étapes suivantes présentent une méthodologie structurée et implémentée dans notre logiciel pour résoudre le problème de sélection de fournisseur.

Problème à résoudre :

- On a trois fournisseurs (Fournisseur A, Fournisseur B, Fournisseur C)
- On a trois critères :
  - Prix : à minimiser
  - Délai : à minimiser
  - Qualité : à maximiser

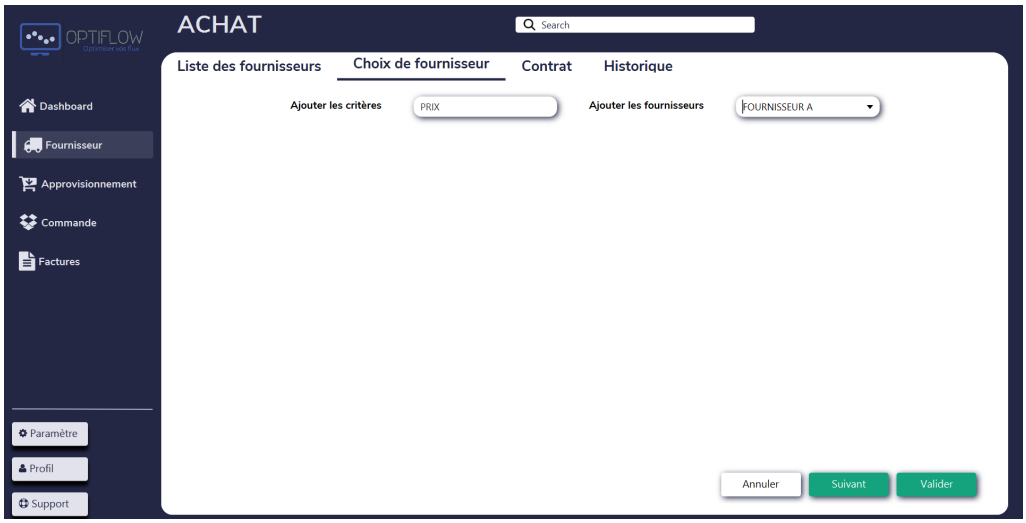
	PRIX	DELAI	QUALITE
Fournisseur A	437 140 DA	20 j	Moyenne
Fournisseur B	309 100 DA	45 j	Mauvaise
Fournisseur C	506 000 DA	30 j	Très bonne

Pour le critère qualitatif 'QUALITE' on met :

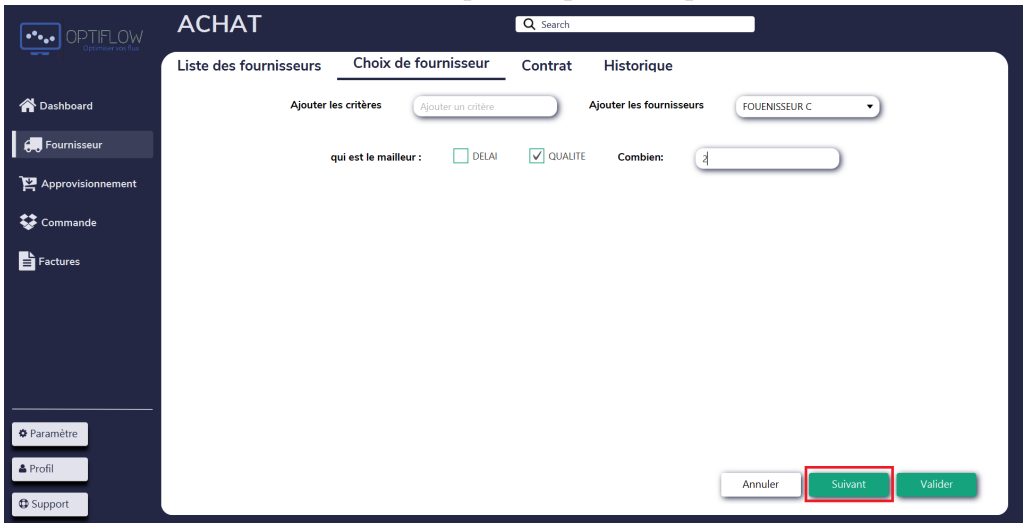
- Très mauvaise : 1
- Mauvaise : 2
- Moyenne : 3
- Bonne : 4
- Très bonne : 5

Étape 1 : Définition des Critères
La première étape consiste à définir les critères, spécifier les critères à maximiser, à minimiser, ainsi que l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres.

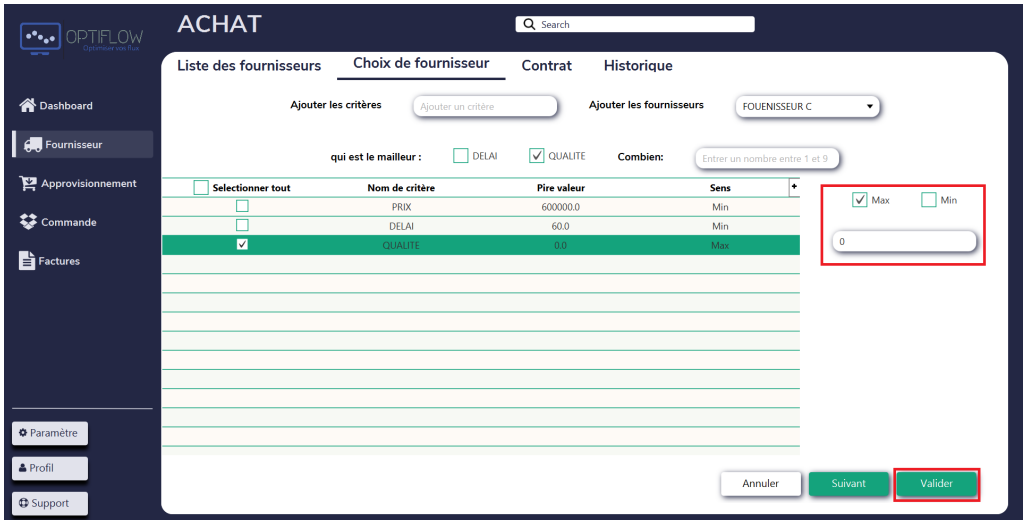
- 1.1. L'utilisateur entre les noms des différents critères.



- 1.2. L'utilisateur sélectionne quel critère est plus important (meilleur) et attribue combien le critère sélectionné est plus important que l'autre.



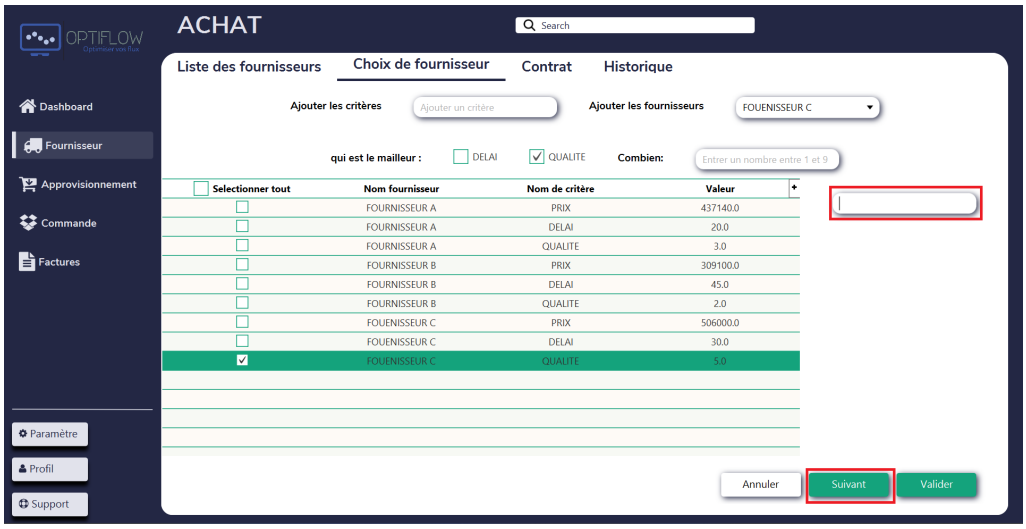
- 1.3. L'utilisateur spécifie pour chaque critère s'il doit être maximisé ou minimisé.
- 1.4. L'utilisateur spécifie la pire valeur pour chaque critère.



Étape 2 : Ajout des Détails des Offres des Fournisseurs

La deuxième étape est l'ajout des détails de chaque offre de chaque fournisseur. Cela inclut des informations spécifiques pour chaque critère.

- 2.1. Saisie des Offres L'utilisateur entre les détails des offres pour chaque fournisseur dans le logiciel.
- 2.2. Validation des Données Après la saisie, l'utilisateur valide les informations.



Étape 3 : Calculation de score des Offres

La dernière étape consiste à utiliser les informations saisies pour calculer le score de chaque offre et établir un classement des offres des fournisseurs.

- 3.1. Calcul des Scores Le logiciel calcule les scores pour chaque offre en fonction des critères et de leurs pondérations.
- 3.2. Affichage du Classement Les offres sont ensuite classées en fonction de leurs scores.

L'indice de cohérence :

C'est un indicateur qui mesure la consistance des jugements de l'utilisateur lorsqu'il compare les critères entre eux. Un indice de cohérence acceptable garantit que les pondérations attribuées aux critères sont logiquement compatibles.

L'indice de cohérence est calculé automatiquement après que l'utilisateur a défini l'importance relative des critères. Sa valeur est affichée en :

- Vert : s'il est acceptable.
- Rouge : s'il n'est pas acceptable.

4.3.4.2 Production :

Ordonnancement :

1. **Problème à résoudre :**
   L'ordonnancement des ordres de fabrication sur les machines dans un environnement de production à capacité limitée, pose des défis importants en termes d'optimisation des ressources et des délais. Ce problème est complexe pour les entreprises qui cherchent à maximiser leurs efficacité tout en réduisant les coûts opérationnels.

2. **Modèle mathématique**

Programmation par contrainte

La programmation par contrainte (Constraint Programming en anglais) est un paradigme de programmation où les problèmes sont formulés en termes de variables dont les valeurs doivent respecter un ensemble de contraintes. Ce paradigme est particulièrement efficace pour résoudre des problèmes combinatoires complexes, où de nombreuses variables interdépendantes doivent satisfaire certaines conditions simultanément.

Fonctionnement des PPC

Dans la PPC, on définit un problème en décrivant les variables de décision et les contraintes qui les relient.

- **Variables de décision :** Elles représentent les éléments inconnus du problème que l'on cherche à déterminer. Par exemple, dans un problème d'ordonnancement de tâches, les variables de décision pourraient être les dates de début et de fin de chaque tâche.
- **Contraintes :** Elles expriment les relations entre les variables de décision et limitent les valeurs possibles qu'elles peuvent prendre. Par exemple, dans le problème d'ordonnancement de tâches, une contrainte pourrait stipuler qu'une tâche ne peut pas commencer avant que sa tâche précédente ne soit terminée.

L'objectif de la PPC est de trouver une solution qui satisfasse à toutes les contraintes.

Notations :

- $M = \{M_1, M_2, \ldots, M_m\}$: Ensemble de machines, où m est le nombre total de machines.
- $J = \{J_1, J_2, \ldots, J_n\}$: Ensemble des ordres de fabrication (OF), où n est le nombre total d'ordres de fabrication.
- O_{ij} : Opération j de l'ordre de fabrication i, où i représente l'indice de l'ordre de fabrication et j l'indice de l'opération dans cet ordre.
- p_{ij} : Temps de traitement de l'opération O_{ij} sur la machine assignée.
- s_{ij} : Temps de début de l'opération O_{ij}.
- C_{ij} : Temps de fin de l'opération O_{ij}.
- T_k : Temps total d'utilisation de la machine M_k, où k représente l'indice de la machine.

Variables de décision

- x_{ijk} : Variable binaire, vaut 1 si l'opération O_{ij} est assignée à la machine M_k, sinon 0.
- C_{max} : Temps total pour terminer toutes les opérations (makespan).

Contraintes

(a) **Assignation unique**
Chaque opération doit être assignée à exactement une machine.

$$\sum_{k=1}^{m} x_{ijk} = 1 \quad \forall i = 1, \ldots, n, \quad \forall j = 1, \ldots, \text{nb_op}(i)$$

où nb_op(i) représente le nombre d'opérations dans l'ordre de fabrication i.

(b) **Ordonnancement des opérations sur la même machine** Si O_{ij} précède O_{il} sur la même machine M_k, alors :

$$s_{il} \geq s_{ij} + p_{ij} \quad \forall i = 1, \ldots, n, \quad \forall j, l = 1, \ldots, \text{nb_op}(i)$$

$$\text{avec} \quad j \neq l \quad \text{et} \quad x_{ijk} = 1 \quad \text{et} \quad x_{ilk} = 1$$

(c) **Contraintes de précédence des opérations dans un OF** Si O_{ij} précède $O_{i(j+1)}$ dans l'ordre de fabrication i, alors :

$$s_{i(j+1)} \geq s_{ij} + p_{ij} \quad \forall i = 1, \ldots, n, \quad \forall j = 1, \ldots, \text{nb_op}(i) - 1$$

(d) **Non-conflit sur les machines** Deux opérations ne peuvent pas être exécutées en même temps sur la même machine :

$$(s_{ij} \geq s_{ik} + p_{ik}) \vee (s_{ik} \geq s_{ij} + p_{ij}) \quad \forall i, j, k \quad \text{avec} \quad x_{ijm} = 1 \quad \text{et} \quad x_{ikm} = 1 \quad \text{et} \quad j \neq k$$

(e) **Temps total d'utilisation de la machine** Le temps total d'utilisation de la machine M_k est la somme des temps de traitement des opérations assignées à cette machine :

$$T_k = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{\text{nb_op}(i)} p_{ij} x_{ijk} \quad \forall k = 1, \ldots, m$$

(f) **Équilibrage de la charge de travail** Les temps d'utilisation des machines doivent être équilibrés pour minimiser la différence entre le temps d'utilisation maximum et minimum :

$$\min \left(\max_{k=1,\ldots,m} (T_k) - \min_{k=1,\ldots,m} (T_k) \right)$$

Fonction Objectif L'objectif est de minimiser la différence entre le temps d'utilisation maximum et minimum des machines, de maximiser leur utilisation et de minimiser les temps d'arrêt. Pour cela, nous combinons ces objectifs dans une fonction linéaire pondérée :

$$\min \left(\alpha \left(\max_{k=1,\ldots,m} (T_k) - \min_{k=1,\ldots,m} (T_k) \right) + \beta \sum_{k=1}^{m} \text{idle_time}_k \right)$$

où :

- α et β sont des poids pour équilibrer les objectifs.
- idle_time_k est le temps d'arrêt (temps où la machine M_k n'est pas utilisée).

3. **Formulation en PLNE**
   Pour illustrer la formulation en programmation linéaire en nombres entiers, voici comment structurer les équations.
   - **Variables de Décision**

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1,\ldots,n, \quad \forall j = 1,\ldots,\text{nb_op}(i), \quad \forall k = 1,\ldots,m$$

$$s_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1,\ldots,n, \quad \forall j = 1,\ldots,\text{nb_op}(i)$$

$$C_{max} \geq 0$$

$$T_k \geq 0 \quad \forall k = 1,\ldots,m$$

   - **Fonction Objectif**

$$\min \left(\alpha \left(\max_{k=1,\ldots,m} (T_k) - \min_{k=1,\ldots,m} (T_k) \right) + \beta \sum_{k=1}^{m} \text{idle_time}_k \right)$$

   - **Contraintes**

$$\sum_{k=1}^{m} x_{ijk} = 1 \quad \forall i = 1,\ldots,n, \quad \forall j = 1,\ldots,\text{nb_op}(i)$$

$$s_{il} \geq s_{ij} + p_{ij} - M(1 - x_{ijk}x_{ilk}) \quad \forall i = 1,\ldots,n, \quad \forall j,l = 1,\ldots,\text{nb_op}(i) \quad \text{avec} \quad j \neq l$$

$$s_{i(j+1)} \geq s_{ij} + p_{ij} \quad \forall i = 1,\ldots,n, \quad \forall j = 1,\ldots,\text{nb_op}(i) - 1$$

$$(s_{ij} \geq s_{ik} + p_{ik}) \vee (s_{ik} \geq s_{ij} + p_{ij}) \quad \forall i,j,k \quad \text{avec} \quad x_{ijm} = 1 \quad \text{et} \quad x_{ikm} = 1 \quad \text{et} \quad j \neq k$$

$$T_k = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{\text{nb_op}(i)} p_{ij}x_{ijk} \quad \forall k = 1,\ldots,m$$

$$C_{max} \geq s_{ij} + p_{ij} \quad \forall i = 1,\ldots,n, \quad \forall j = 1,\ldots,\text{nb_op}(i)$$

4. **Explication :**
   - **Non-chevauchement** : Cette contrainte garantit que deux opérations ne se chevauchent pas sur la même machine. Si une machine commence une nouvelle opération avant que la précédente ne soit terminée, cela créerait des conflits et des incohérences dans le planning.

- **Séquence d'opérations** : Elle impose une séquence claire et ordonnée des opérations sur une machine donnée, ce qui est nécessaire pour une planification efficace et réaliste.
- **Ordonnancement des opérations sur la même machine :** L'ordonnancement des opérations sur la même machine consiste à organiser les opérations de manière à ce qu'elles soient effectuées en séquence sans chevauchement. Cela signifie qu'une machine ne peut traiter qu'une seule opération à la fois, et chaque opération doit commencer seulement après la fin de l'opération précédente sur la même machine.
  Exemple :
  Prenons un exemple simple avec deux opérations O_1 et O_2 à traiter sur une machine M.
  - Durée de O_1 : $p_1 = 3$
  - Durée de O_2 : $p_2 = 4$
  - Début de O_1 : $s_1 = 0$ (par exemple)
  - Fin de O_1 : $s_1 + p_1 = 0 + 3 = 3$

  Pour que O_2 commence après la fin de O_1, nous devons avoir :

  $$s_2 \geq 3$$

  Ainsi, s_2 ne peut être inférieur à 3. Si s_2 était, par exemple, 2, cela violerait la contrainte et signifierait que les deux opérations se chevauchent.

- **Optimisation** : En respectant cette contrainte, nous pouvons optimiser l'utilisation des machines et minimiser les temps d'attente et les délais dans le processus de production.

5. **Résumé du Processus de Gestion des Ordres de Fabrication**

Génération et Gestion des Ordres de Fabrication (OF)

- Les OF peuvent être générés automatiquement à partir du Plan Directeur de Production (PDP).
- Les utilisateurs peuvent également introduire de nouveaux OF ou modifier les OF existants manuellement.
- Chaque OF contient des informations telles que :
  - l'ID de l'OF,
  - la référence (par exemple, OF-3A097),
  - une liste d'opérations (mélanger, comptage, compression, pelliculage, conditionnement), chacune ayant une durée d'exécution aléatoire.

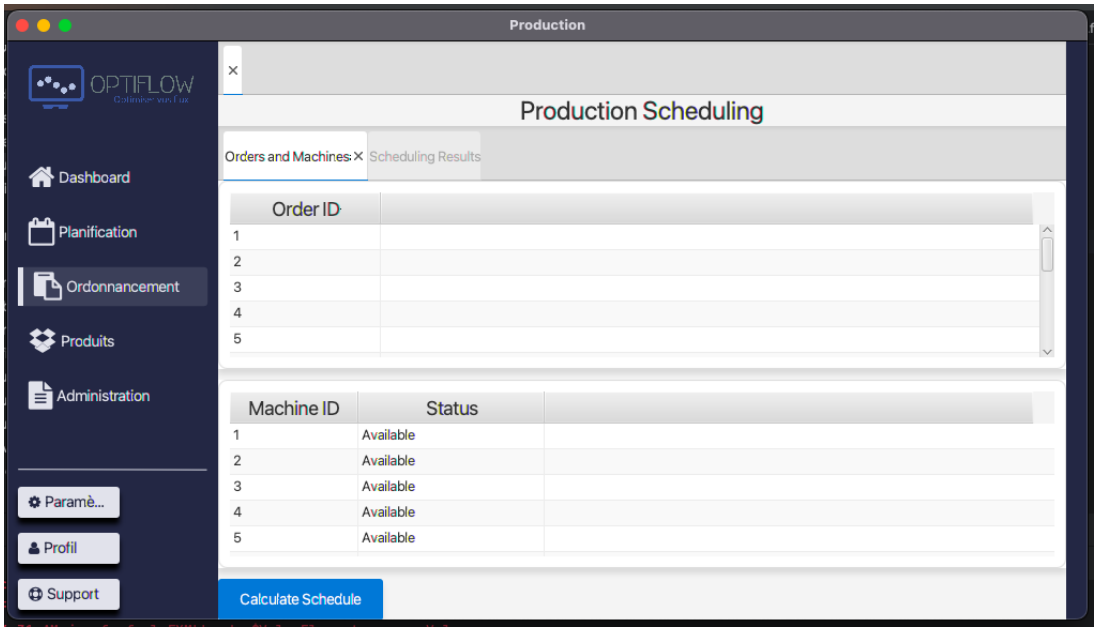
Gestion des Machines

- Les utilisateurs peuvent définir et modifier l'état des machines. Les états possibles incluent :
  - disponible,

- occupé,
- en panne.

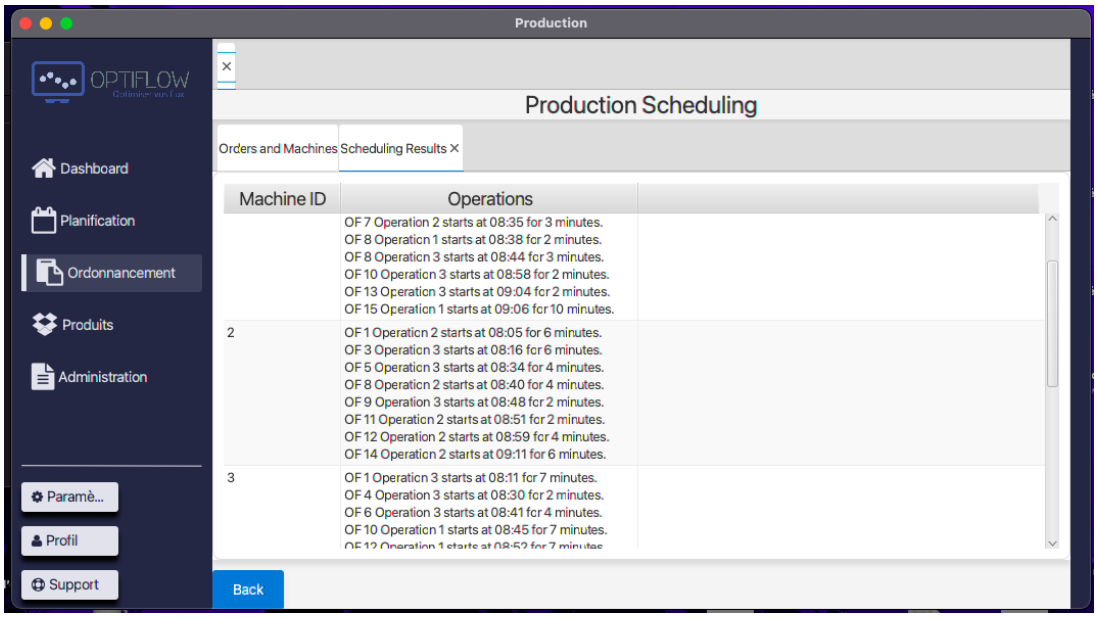
– Chaque machine est dédiée à un seul type d'opération. Par exemple, une machine de compression s'appellera *Compresseur*.
– Les informations sur les machines incluent :

- l'ID de la machine,
- le nom de la machine,
- l'opération associée,
- l'état de la machine.



Calcul et Affichage des Résultats

– Une fois que toutes les variables nécessaires (OF et machines) sont disponibles et correctement configurées par l'utilisateur, le calcul de la planification peut être effectué.
– L'utilisateur déclenche ce calcul en cliquant sur le bouton *Calculate Schedule*.
– Après le clic, l'onglet *Scheduling Results* s'ouvre automatiquement.
– Cet onglet affiche l'affectation optimale des OF aux machines, en équilibrant l'utilisation des machines et en réduisant les temps d'arrêt.



– Les résultats montrent comment chaque machine est utilisée pour chaque opération, y compris les durées correspondantes.

4.3.4.3 WMS :

NSGA-II

Variables de Décision

- $x_{pi,x,y,z}$: Variable continue représentant la proportion de la quantité du produit p_i stockée dans la cellule (x, y, z).

$$0 \leq x_{pi,x,y,z} \leq 1$$

Paramètres

- P : Ensemble de produits.
- q_i : Quantité du produit p_i.
- v_i : Volume unitaire du produit p_i.
- r_i : Valeur de rotation du produit p_i.
- W : Entrepôt avec dimensions $X \times Y \times Z$.
- E : Ensemble de points d'expédition.
- $d_{(x1,y1,z1),(x2,y2,z2)}$: Distance entre deux cellules $(x1, y1, z1)$ et $(x2, y2, z2)$.
- Distance$((x, y, z), e_j)$: Distance entre la cellule (x, y, z) et le point d'expédition e_j.
- Capacité$_{(x,y,z)} = 0.96$: Capacité d'une cellule .

Objectifs

- **Minimiser la distance entre les produits à grande rotation et les points d'expédition** :

$$f_1 = \sum_{p_i \in P} \sum_{e_j \in E} r_i \cdot \left(\sum_{(x,y,z) \in W} x_{pi,x,y,z} \cdot \text{Distance}((x, y, z), e_j) \right)$$

- **Minimiser la distance entre les produits du même type** :

$$f_2 = \sum_{p_i \in P} \sum_{(x1,y1,z1) \in W} \sum_{(x2,y2,z2) \in W (x1,y1,z1) < (x2,y2,z2)} d_{(x1,y1,z1),(x2,y2,z2)} \cdot x_{pi,x1,y1,z1} \cdot x_{pi,x2,y2,z2}$$

Contraintes

- **Capacité de l'entrepôt** : Le volume total de produit i dans chaque cellule ne doit pas dépasser la capacité de la cellule.

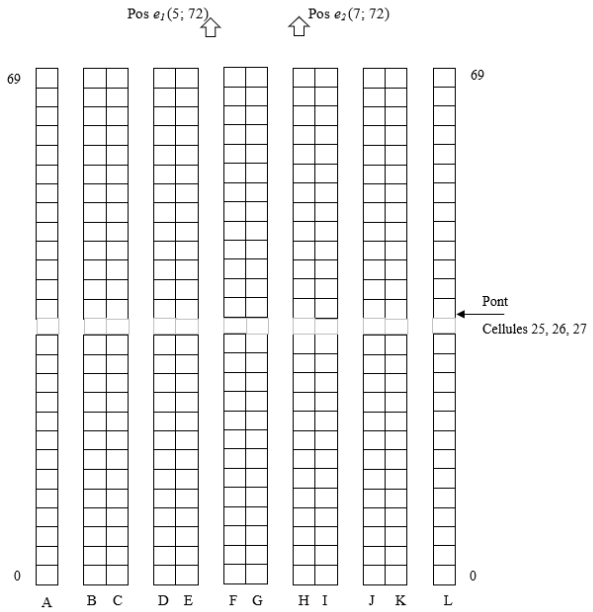
$$\sum_{p_i \in P} x_{pi,x,y,z} \leq 0.96, \quad \forall (x,y,z) \in W$$

Problème de Choix d'emplacement dans un Entrepôt

La gestion des entrepôts est essentielle pour garantir l'efficacité et la précision des opérations. Le choix d'emplacement est important pour assurer une gestion efficace. Ce processus est automatisé grâce à notre logiciel qui propose des affectations optimisées, ce qui permet de minimiser les erreurs humaines.

Problème à résoudre L'entrepôt de Sidi-Moussa est un dépôt appartenant à EL-Kendi Pharma où cette dernière stocke uniquement les produits finis.

Schéma zone de stockage entrepot Sidi Moussa :



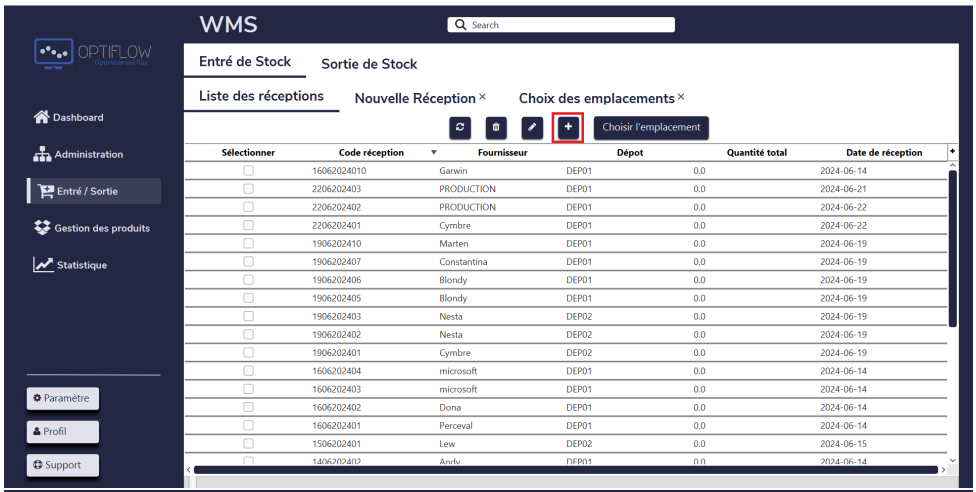
- Nombre de racks : 12 (de A à L)
- Rayonnage : 69 (78 A)
- Niveau : 5 niveaux (de 0 à 5)
- Pont vide (niveau 1 et 2) 252627
- Points d'expédition situés à la fin de l'entrepôt (e1, e2)

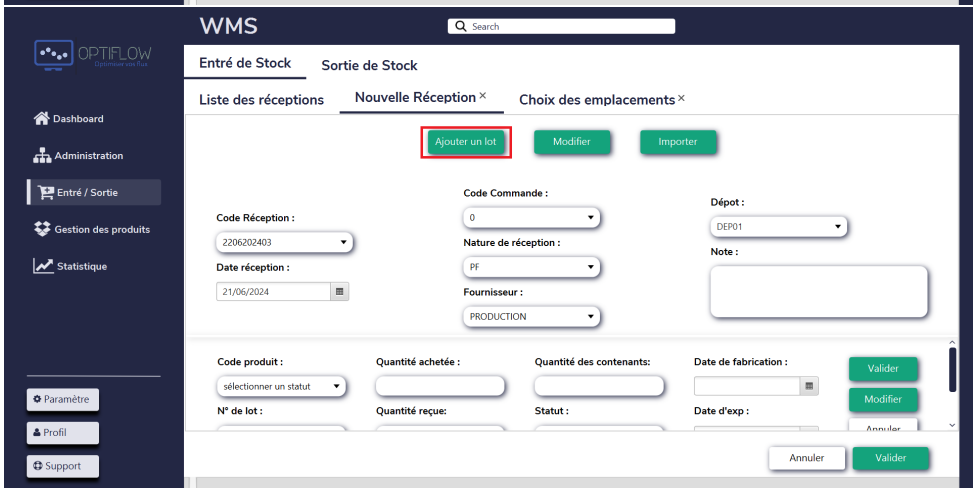
Pos e2 (7 ; 72)
Pos e1 (5 ; 72)

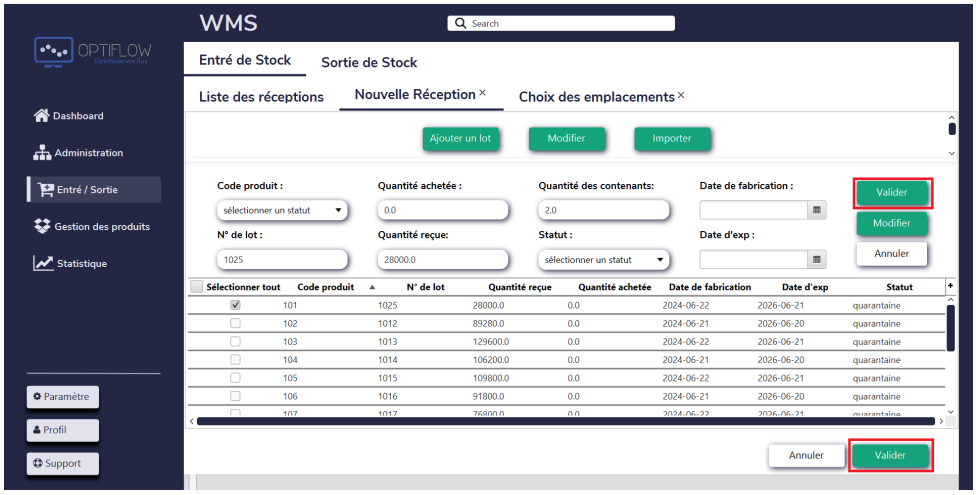
Forme du médicament	Exemple de médicament	Nombre de boite par colis	Nombre de colis par palette	volume/boite	rotation	Quantité
Liquide	EZILAX Syrup	24	40	1000	0,9	89280
	FLAZOL Oral Suspension	60	30	533,3333333	0,85	129600
	MENTEX Syrup	60	30	533,3333333	0,88	106200
	PROF Oral Suspension	60	30	533,3333333	0,8	109800
	CALEVIT Syrup	60	30	533,3333333	0,6	91800
Semi-solide	TABETA pommade	150	64	100	0,2	76800
	ZETA Cream	150	64	100	0,82	9600
	ZETA POMMADE	150	64	100	0,89	9600
	ZETACORT Cream	150	64	100	0,65	105600
	TABIFLEX COOL Gel	150	24	266,6666667	0,3	133200
Comprimé	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	160	24	250	0,7	99840
	LANZAPPREX	160	18	333,3333333	0,6	129600
	FLAZOL 500 Coat Tablets	200	50	96	0,94	80000
	RAPIDUS	200	70	68,57142857	0,96	28000

Étape 1 : Ajout d'une Réception La première étape du processus c'est d'ajouter une nouvelle réception.

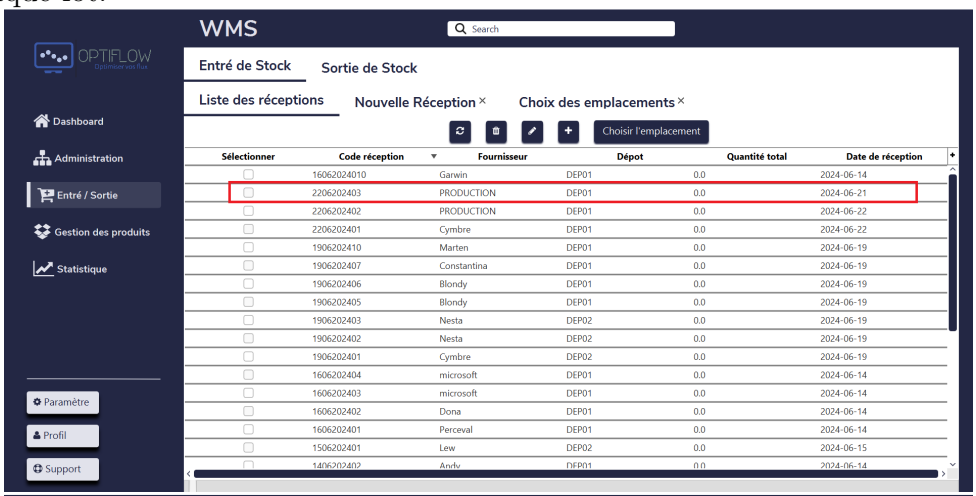
- 1.1. Ajouter un lot : l'utilisateur entre les détails du lot.
- 1.2. Validation : on valide les entrées pour passer à la fenêtre d'affectation des emplacements.

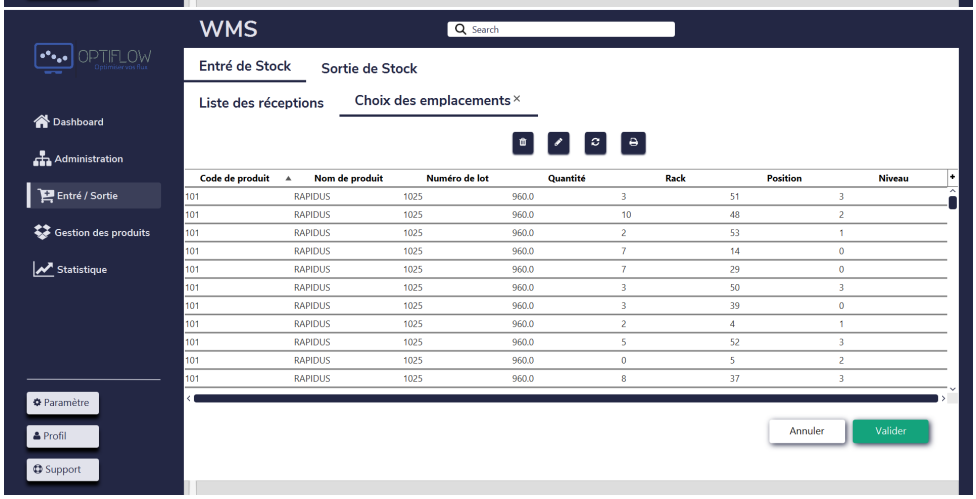






Étape 2 : Sélectionner les nouvelles réceptions Sélectionner les nouvelles réceptions ou nouveaux lots et cliquer sur 'choisir l'emplacement'. Ensuite, le logiciel procède à l'affectation automatique des emplacements. Cette étape utilise l'algorithme NSGA 2, qui est inclus dans la bibliothèque JMetal, pour déterminer l'emplacement optimal pour chaque lot.





4.3.4.4 TMS

TMS :

Modélisation Mathématique du Problème de Tournées de Véhicules avec Capacités (CVRP) :
L'objectif est de déterminer un ensemble de routes pour une flotte de véhicules, de manière à desservir tous les clients tout en minimisant le coût total et en respectant les contraintes de capacité.

Données et Paramètres :

- $G = (V, E)$: un graphe où $V = \{0, 1, \ldots, n\}$ est l'ensemble des sommets , avec 0 représentant le dépôt et $1, \ldots, n$ représentant les clients.
- c_{ij} : le coût (ou la distance) de déplacement entre le sommet i et le sommet j.
- d_i : la demande du client i.
- Q : la capacité maximale de chaque véhicule.
- K : le nombre de véhicules disponibles.

Variables de Décision :

- x_{ij}^k : variable binaire indiquant si le véhicule k utilise l'arête (i, j) (1 si vrai, 0 sinon).
- u_i : variable continue représentant la charge cumulée livrée au sommet i.

Fonction Objectif : Minimiser le coût total de distribution :

$$\min \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} c_{ij} x_{ij}^k$$

Contraintes :

1. Chaque client est visité exactement une fois par un seul véhicule :

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=0, j \neq i}^{n} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i = 1, \ldots, n$$

2. Les véhicules partent et reviennent au dépôt :

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k = 1, \ldots, K$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i0}^k = 1 \quad \forall k = 1, \ldots, K$$

3. Flux de véhicules pour assurer des routes fermées :

$$\sum_{i=0, i \neq j}^{n} x_{ij}^k = \sum_{i=0, i \neq j}^{n} x_{ji}^k \quad \forall j = 1, \ldots, n, \forall k = 1, \ldots, K$$

4. Capacité des véhicules :

$$\sum_{i=1}^{n} d_i \left(\sum_{j=0, j\neq i}^{n} x_{ij}^{k} \right) \leq Q \quad \forall k \in \{1, 2, \ldots, m\}$$

$$\forall i = 1, \ldots, n$$

5. Conservation des flux :

$$\sum_{j=0, j\neq i}^{n} x_{ij} = \sum_{j=0, j\neq i}^{n} x_{ji} \quad \forall i \in \{1, 2, ..., n\}$$

6. Domaines des variables :

$$x_{ij}^{k} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j = 0, \ldots, n, \forall k = 1, \ldots, K$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \ldots, n$$

Introduction

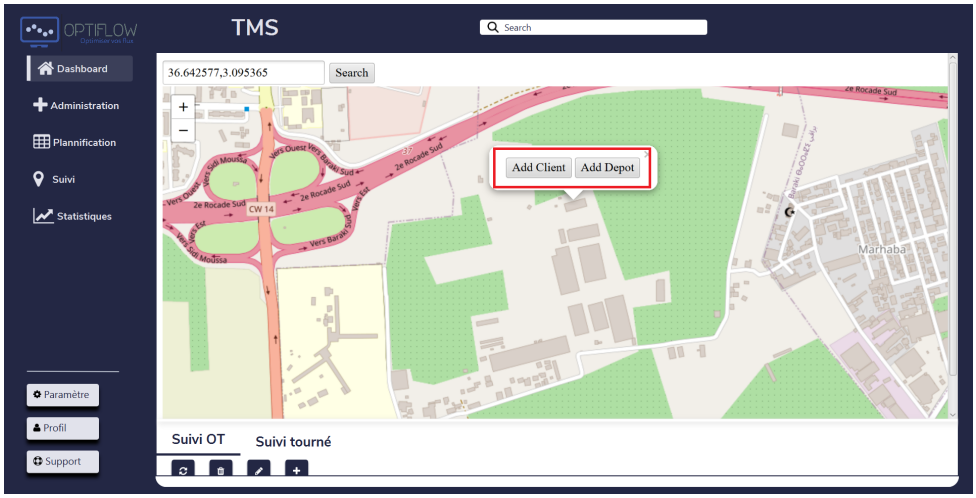
Optimiser les opérations logistiques est essentiel pour garantir l'efficacité des services tout en minimisant les coûts opérationnels. Le Problème de Tournées de Véhicules avec Capacités (CVRP) est une problématique cruciale dans ce domaine, car il permet de planifier des tournées de livraison de manière optimale.

Problème à résoudre

- On a onze clients (Client 1, Client 2, Client 3, Client 4, Client 5, Client 6, Client 7, Client 8, Client 9, Client 10, Client 11).
- On a divers produits à livrer à chaque client, chaque produit ayant une demande spécifique.
- L'objectif est d'optimiser les tournées des véhicules pour minimiser le coût total de distribution tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules.

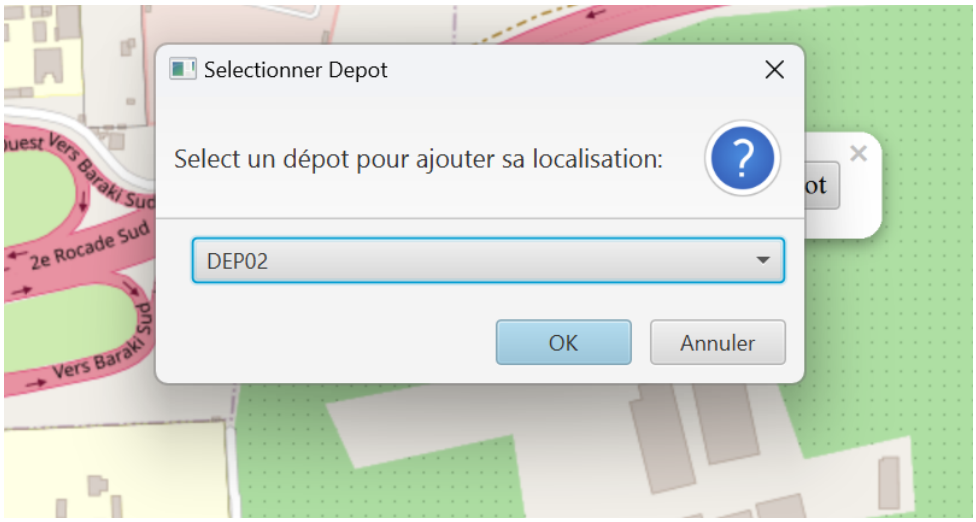
Saisie des entrées

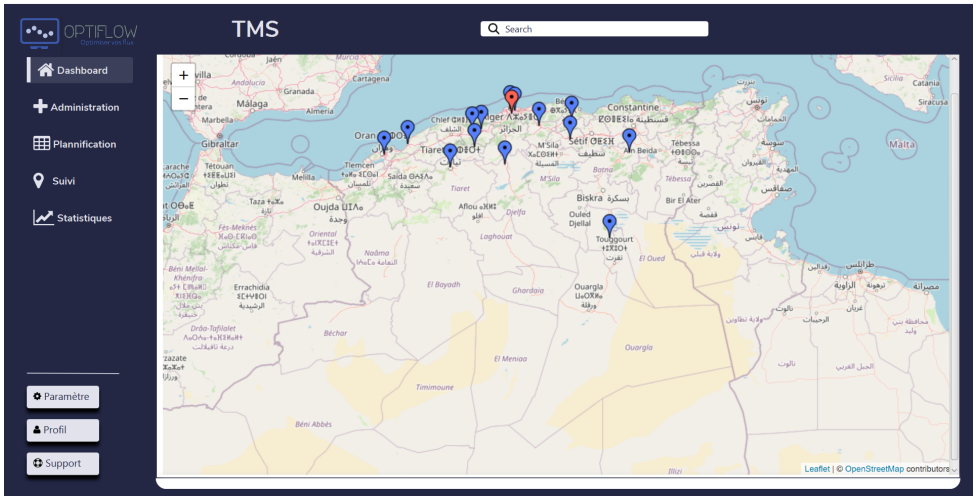
1. Localiser les clients et le dépôt dans la MAP.



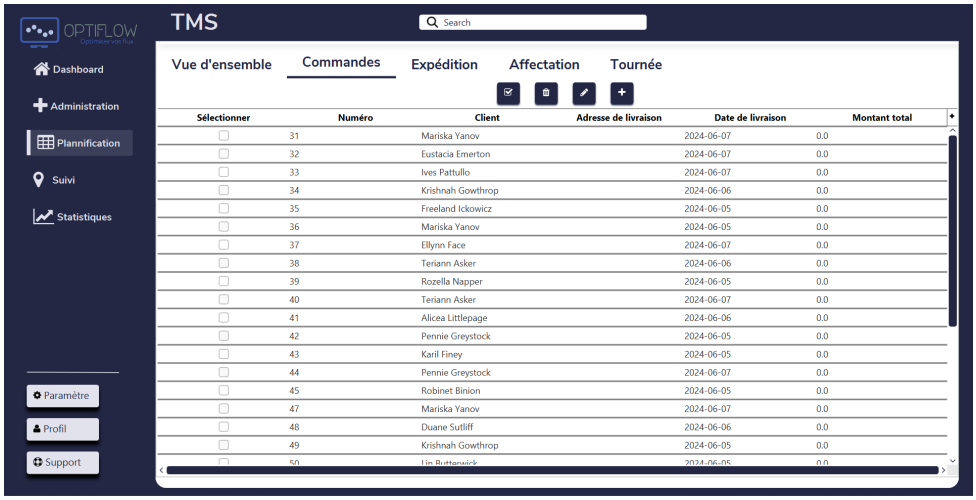
Données des commandes

Client	Produit	Quantité commandée
Client 1	PROF Oral Suspension	33245
	TABETA pommade	23108
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	17314
Client 2	RAPIDUS	21134
	TABIFLEX COOL Gel	36355
Client 3	PROF Oral Suspension	14628
	TABIFLEX COOL Gel	11689
	ZETACORT Cream	36706
Client 4	FLAZOL Oral Suspension	25834
	ZETA POMMADE	8347
Client 5	ZETACORT Cream	33344
	EZILAX Syrup	11074
	PROF Oral Suspension	27330
Client 6	TABIFLEX COOL Gel	26093
	FLAZOL Oral Suspension	45790
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	13091
Client 7	TABIFLEX COOL Gel	11349
	MENTEX Syrup	43563
Client 8	MENTEX Syrup	44638
	TABETA pommade	42018
Client 9	TABIFLEX COOL Gel	10891
	ZETACORT Cream	13818
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	28386
Client 10	TABIFLEX COOL Gel	22606
	FLAZOL Oral Suspension	33987
	ZETACORT Cream	2528
Client 11	FLAZOL Oral Suspension	13730
	ZETA Cream	7169
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	28837

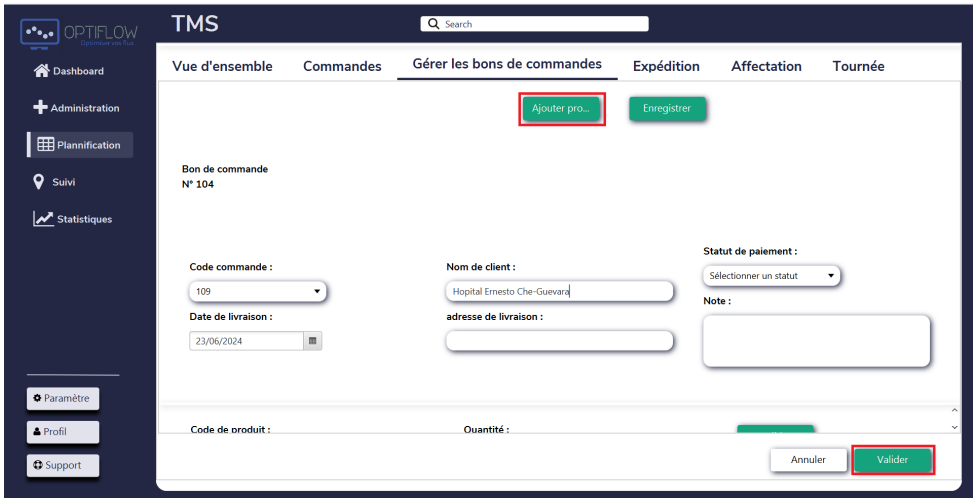


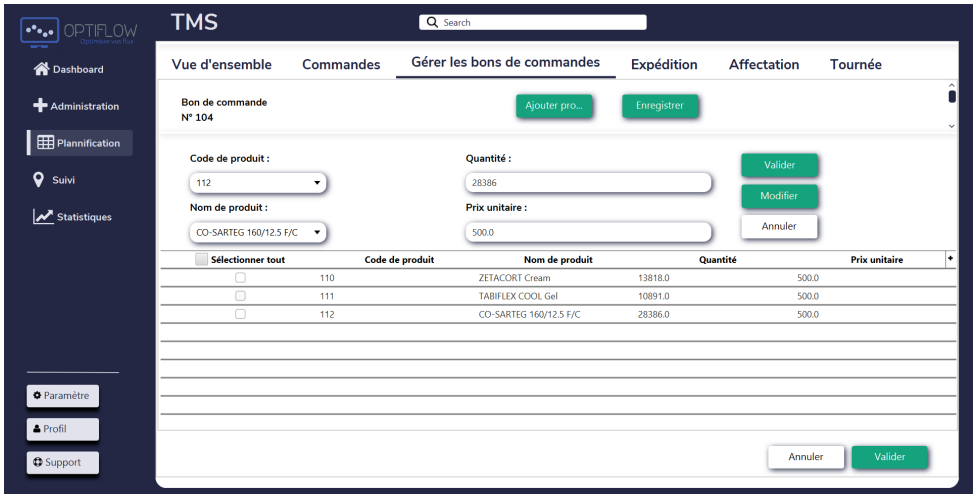


2. Ajouter les commandes des clients.

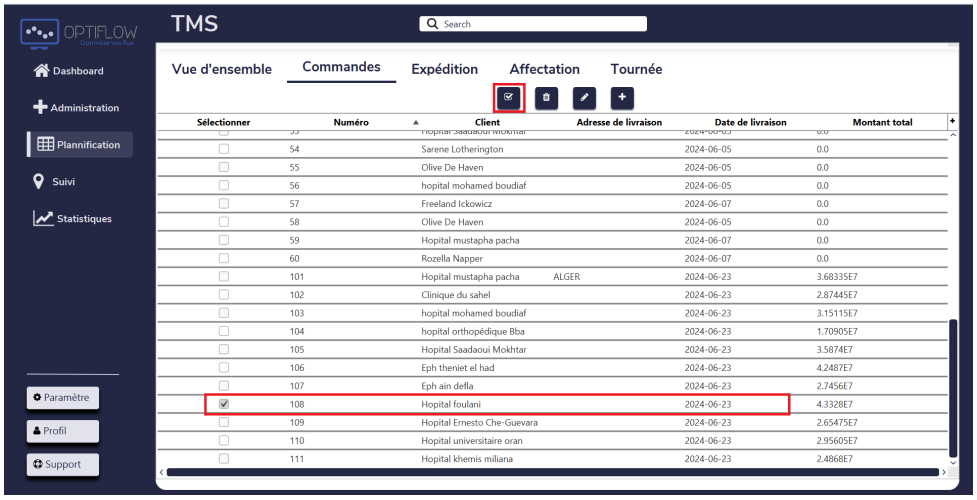


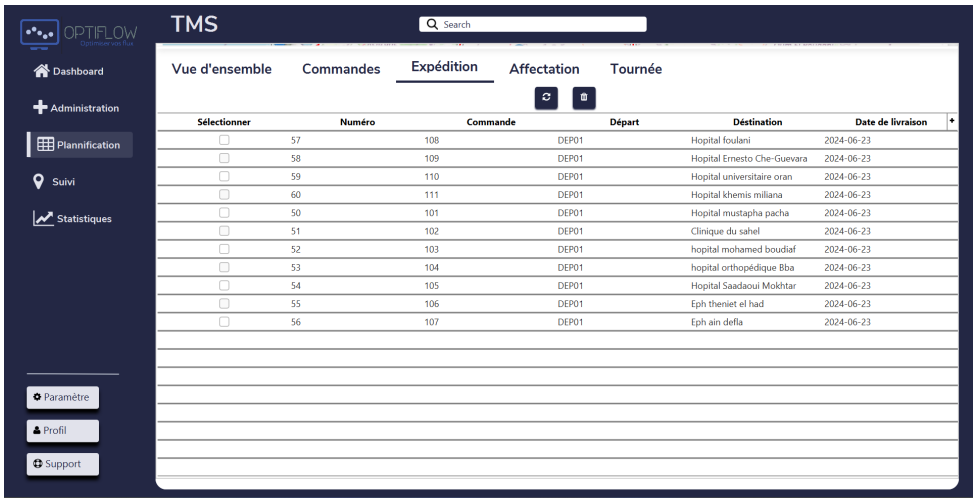
3. Saisie des Données de Commande et des Produits Associés.



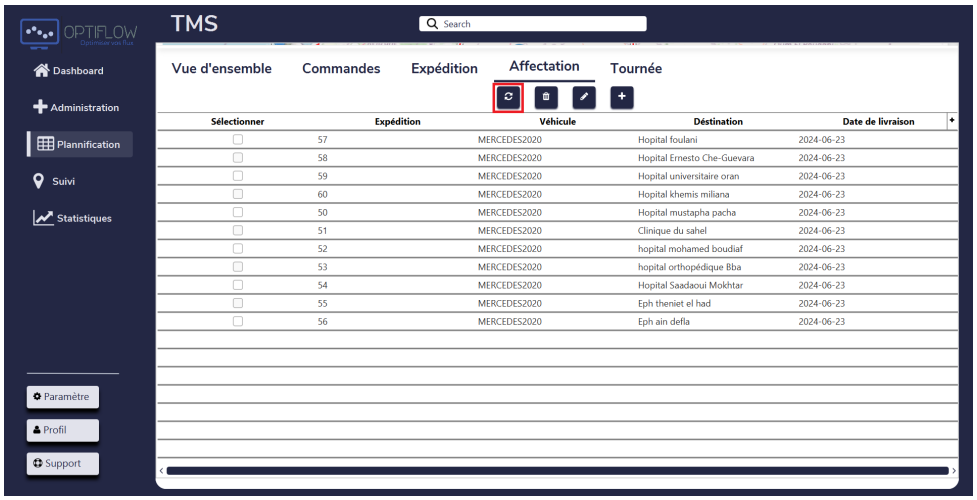


4. Sélection des Commandes à Expédier pour la Tournée de Véhicule.





5. Lancement de l'Optimisation : En cliquant sur le bouton d'optimisation dans la fenêtre d'affectation, l'utilisateur reçoit les affectations des commandes aux camions.

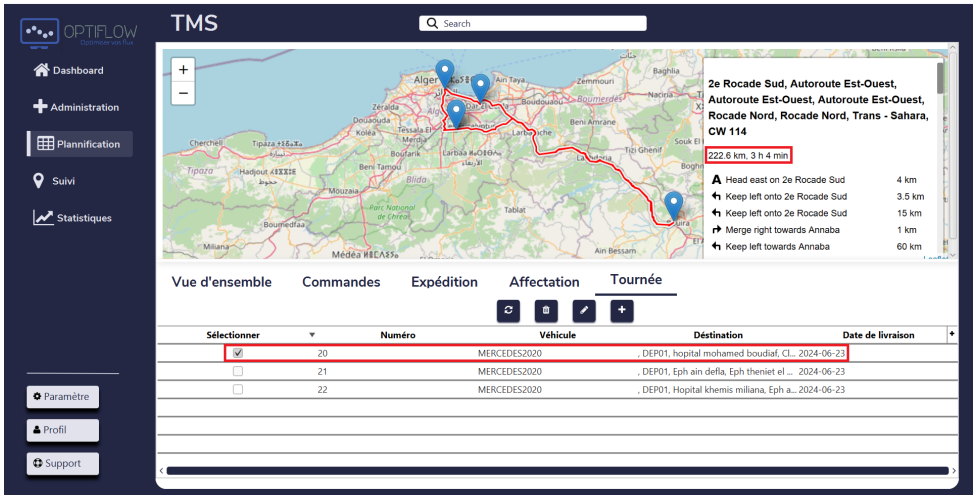


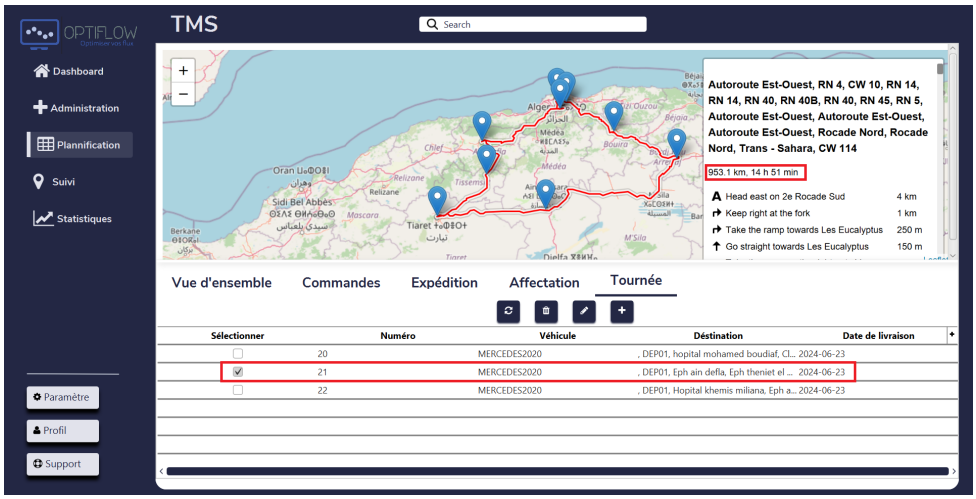
Résultat

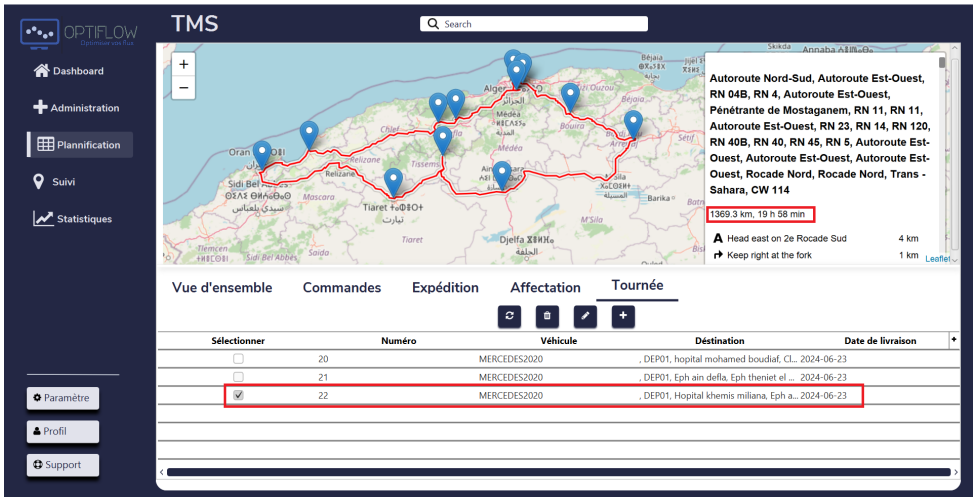
Notre algorithme utilise l'API d'OpenRouteService. En envoyant les véhicules disponibles et leurs capacités, ainsi que les données des commandes comprenant les clients et les quantités de produits à livrer, nous recevons une réponse optimisant les tournées des véhicules pour livrer les produits aux clients de manière efficace.

Voici les résultats de notre simulation :

Résultats de la simulation


OPTIFLOW
TMS
Search
Dashboard
Administration
Plannification
Suivi
Statistiques
Paramètre
Profil
Support
2e Rocade Sud, Autoroute Est-Ouest, Autoroute Est-Ouest, Autoroute Est-Ouest, Rocade Nord, Rocade Nord, Trans - Sahara, CW 114
222.6 km, 3 h 4 min
Head east on 2e Rocade Sud 4 km
Keep left onto 2e Rocade Sud 3.5 km
Keep left onto 2e Rocade Sud 15 km
Merge right towards Annaba 1 km
Keep left towards Annaba 60 km
Vue d'ensemble
Commandes
Expédition
Affectation
Tournée
Sélectionner
Numéro
Véhicule
Déstination
Date de livraison
20 MERCEDES2020 , DEP01, hopital mohamed boudiaf, Cl... 2024-06-23
21 MERCEDES2020 , DEP01, Eph ain defla, Eph theniet el ... 2024-06-23
22 MERCEDES2020 , DEP01, Hopital khemis miliana, Eph a... 2024-06-23


OPTIFLOW
TMS
Search
Dashboard
Administration
Plannification
Suivi
Statistiques
Paramètre
Profil
Support
Autoroute Est-Ouest, RN 4, CW 10, RN 14, RN 14, RN 40, RN 40B, RN 40, RN 45, RN 5, Autoroute Est-Ouest, Autoroute Est-Ouest, Autoroute Est-Ouest, Rocade Nord, Rocade Nord, Trans - Sahara, CW 114
953.1 km, 14 h 51 min
Head east on 2e Rocade Sud 4 km
Keep right at the fork 1 km
Take the ramp towards Les Eucalyptus 250 m
Go straight towards Les Eucalyptus 150 m
Vue d'ensemble
Commandes
Expédition
Affectation
Tournée
Sélectionner
Numéro
Véhicule
Déstination
Date de livraison
20 MERCEDES2020 , DEP01, hopital mohamed boudiaf, Cl... 2024-06-23
21 MERCEDES2020 , DEP01, Eph ain defla, Eph theniet el ... 2024-06-23
22 MERCEDES2020 , DEP01, Hopital khemis miliana, Eph a... 2024-06-23


OPTIFLOW
TMS
Search
Dashboard
Administration
Plannification
Suivi
Statistiques
Paramètre
Profil
Support
Autoroute Nord-Sud, Autoroute Est-Ouest, RN 04B, RN 4, Autoroute Est-Ouest, Pénétrante de Mostaganem, RN 11, RN 11, Autoroute Est-Ouest, RN 23, RN 14, RN 120, RN 40B, RN 40, RN 45, RN 5, Autoroute Est-Ouest, Autoroute Est-Ouest, Autoroute Est-Ouest, Rocade Nord, Rocade Nord, Trans - Sahara, CW 114
1369.3 km, 19 h 58 min
Head east on 2e Rocade Sud 4 km
Keep right at the fork 1 km
Vue d'ensemble
Commandes
Expédition
Affectation
Tournée
Sélectionner
Numéro
Véhicule
Déstination
Date de livraison
20 MERCEDES2020 , DEP01, hopital mohamed boudiaf, Cl... 2024-06-23
21 MERCEDES2020 , DEP01, Eph ain defla, Eph theniet el ... 2024-06-23
22 MERCEDES2020 , DEP01, Hopital khemis miliana, Eph a... 2024-06-23

4.4 Implémentation

dans la cette partie on va aborder les étapes nécessaires pour installer OptiFlow .

OPTIFLOW
Optimiser vos flux

Prérequis

Avant de commencer l'installation, assurez-vous d'avoir :

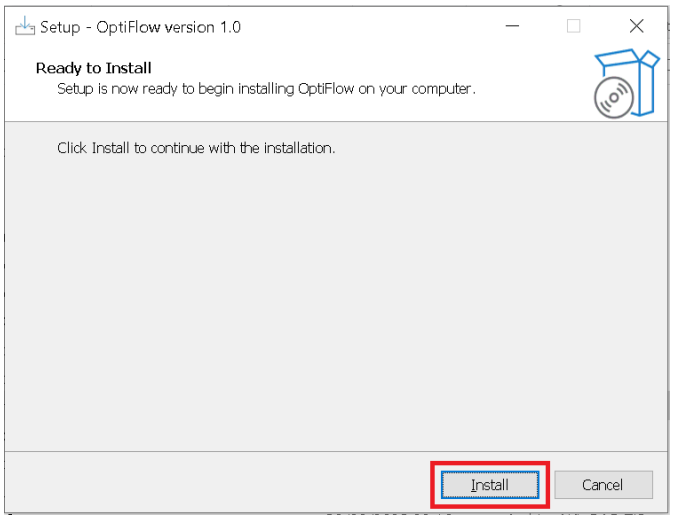
- Un PC sous Windows 7, 8, 10 ou une version ultérieure.
- Une connexion Internet pour télécharger le fichier d'installation.
- Les droits administratifs sur le PC pour installer des logiciels.

Étape 1 : Exécution du fichier d'installation

1. Une fois le téléchargement terminé, localiser le fichier `OptiFlowSetup.exe` dans le dossier de téléchargements.
2. Double-clique sur le fichier `OptiFlowSetup.exe` pour lancer l'installation.

Étape 2 : Installation de l'application

1. Une fenêtre de dialogue s'ouvrira pour guider à travers le processus d'installation.
2. Suivre les instructions à l'écran :
    - Cliquer sur "Install" pour continuer.



- Choisir le dossier de destination pour l'installation, ou laisser le dossier par défaut.
- Cliquer sur "Suivant" pour commencer l'éxtraction des fichiers.

3. Attendre que l'éxtraction se termine. Cela peut prendre quelques minutes.

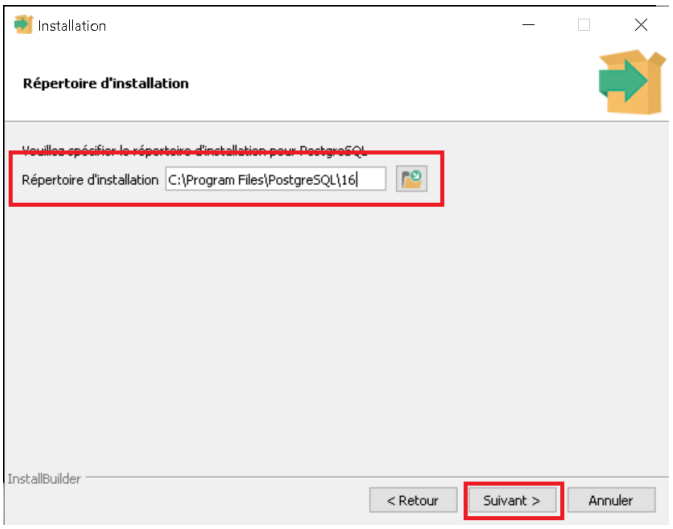
Étape 3 : Installation des Dépendances

Installation de JDK 22

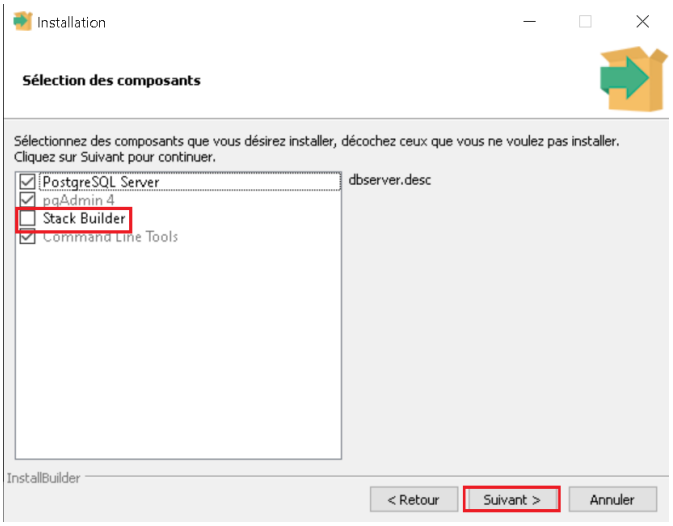
1. Après l'extraction des fichiers, l'installation de JDK 22 commencera automatiquement.
2. Suivre les instructions à l'écran pour installer JDK 22.

Installation de PostgreSQL

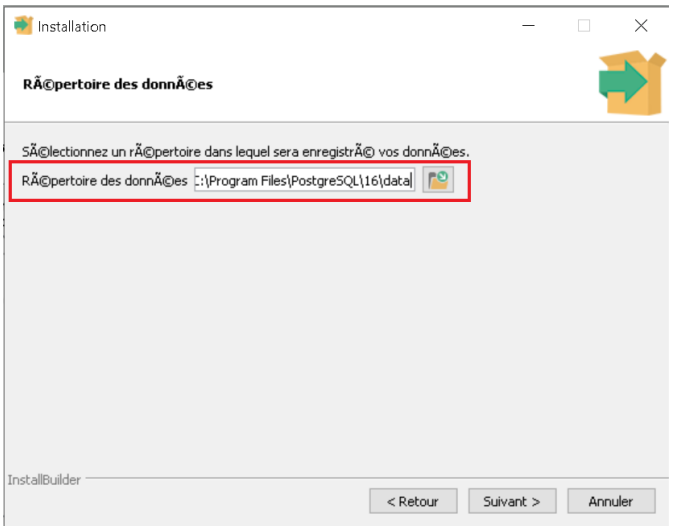
1. Une fois JDK 22 installé, l'installation de PostgreSQL commencera automatiquement.
2. Suivre les instructions à l'écran pour installer PostgreSQL.



3. Décocher dans la fenêtre des composants, Stack Builder si vous n'avez pas besoin, puis cliquer sur Suivant



4. laisser les mêmes chemins des fichiers proposés, à fin de garantire le bon fonctionnement du logiciel



Étape 4 : Fin de l'installation

1. Une fois l'installation terminée, cliquer sur "Terminer" pour fermer l'assistant d'installation.

Étape 5 : Lancement de l'application

1. L'application sera lancer automatiquement après la fin de l'installation.
2. Pour lancer OptiFlow, double-clique sur l'icône OptiFlow qui a été créée sur le chemin qui a été choisi lors de l'installation. OptiFlow installé avec succès sur votre PC

4.5 Conclusion

Cette partie pratique a concrétisé notre vision du système ERP pour EL KENDI. La conception, basée sur les diagrammes UML, a posé les fondations solides du projet. La réalisation a mis en lumière l'architecture choisie, l'analyse fonctionnelle et les algorithmes d'optimisation, démontrant notre engagement à fournir une solution performante. Le choix des technologies et frameworks a été déterminant pour la robustesse du système.
L'implémentation a transformé ces concepts en un outil fonctionnel, adapté aux réalités d'EL KENDI. Ce parcours illustre la transformation d'une idée en une solution ERP concrète, capable de relever les défis identifiés et d'apporter une réelle valeur ajoutée à l'entreprise dans sa gestion quotidienne et sa prise de décision stratégique.

Conclusion Générale

La gestion efficace de la chaîne logistique est essentielle pour la compétitivité et la performance globale d'une entreprise. Une chaîne logistique bien gérée permet non seulement de réduire les coûts opérationnels, mais aussi d'améliorer la satisfaction client en assurant des livraisons ponctuelles et en maintenant des niveaux de stock optimaux.
L'optimisation de chaque maillon de cette chaîne est essentielle pour répondre aux défis du marché actuel et pour rester agile face aux fluctuations de la demande.

Dans notre travail, nous avons abordé divers problèmes d'optimisation pour améliorer la gestion de la chaîne logistique. Nous avons résolu le problème du tourné de véhicule pour optimiser les trajets de livraison, le problème d'affectation pour la gestion de la production afin d'optimiser l'allocation des ressources, et l'affectation des produits finis vers des emplacements dans leurs zones de stockage pour une gestion efficace des inventaires. De plus, nous avons développé une aide à la décision multicritère pour le choix des fournisseurs, afin de garantir des partenariats stratégiques et fiables.

Le mémoire commence par définir le contexte et la problématique de l'entreprise EL KENDI, en identifiant les défis majeurs de la gestion de la chaîne logistique et de la production, et en justifiant la nécessité d'un ERP. Ensuite, nous explorons les systèmes ERP, leurs fonctionnalités et avantages, ainsi que les implications organisationnelles de leur déploiement. Nous détaillons les méthodologies de conception du système ERP, en se concentrant sur les choix techniques et les modules spécifiques à intégrer pour répondre aux besoins identifiés. L'implémentation pratique du système ERP est décrite, incluant les tests réalisés pour valider son efficacité et les ajustements effectués. Nous analysons les résultats obtenus suite à l'implémentation de l'ERP, discutons des performances et des bénéfices constatés, et proposons des améliorations pour optimiser davantage le système. Enfin, nous synthétisons les conclusions principales du mémoire, évaluons l'impact global de l'ERP sur l'entreprise, et suggérons des perspectives pour des développements futurs et des recherches complémentaires.

Bibliographie

[1] Akkermans, H. A., Bogerd, P., Yucesan, E., & Van Wassenhove, L. N. (2003). The impact of ERP on supply chain management : Exploratory findings from a European Delphi study. *European Journal of Operational Research*, 146(2), 284-301.

[2] Baba Sidi, K., & Beddiaf, H. (2018). Optimisation de tourne des vehicules de transport de gasoil a l'aide d'un algorithme evolutionnaire. Dissertation pour le diplôme de Master informatique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.

[3] Ben Mena, S. (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 4(2), 83-93.

[4] Botta-Genoulaz, V., & Millet, P. A. (2006). An investigation into the use of ERP systems in the service sector. *International journal of production economics*, 99(1-2), 202-221.

[5] Boubekeur, R. (2017). Analyse multicritère d'aide à la décision. Mémoire de fin d'études, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM.

[6] Bouchida, N. T., & Kerri, R. (2022). Optimisation du schéma de distribution GPL/C de la région EST Cas-NAFTAL. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.

[7] Boudaoud, W., & Habbiche, A. (2016). Proposition de dimensionnement d'un nouvel entrepôt pour l'aide au choix d'une politique d'entreposage Cas de l'Entreprise pharmaceutique El Kendi. Mémoire de Projet de Fin d'Études, Ecole Nationale Polytechnique.

[8] Bourennani, A., & Mahiaoui, M. A. (2022). Résolution efficace du problème de tournée de véhicules au profit de Béjaïa-Logistique. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.

[9] Bretto, A., Faisant, A., & Hennecart, F. (2012). *Eléments de théorie des graphes*. Springer.

[10] Briane, I., & Ouslimani, L. (2023). Stratégie de déploiement et tableau de bord pour le suivi de la mise en œuvre. Projet de fin d'étude, École Nationale Supérieur de Technologie.

[11] Cadet-Taïrou, A., Canarelli, T., Escots, S., Facy, F., Lanfumey-Mongredien, L., et al. (2012). Médicaments psychotropes : Consommations et pharmacodépendances (Rapport de recherche). Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM). Paris : Inserm : Editions EDP Sciences.

[12] Cheriet, R., & Khaldi, H. (2023). Analyse et prévision des ventes des produits pharmaceutiques avec le modèle LSTM - Cas El KENDI. Mémoire de fin de cycle, Ecole Nationale Supérieure de Statistique et d'Economie Appliquée : ENSSEA – Kolea.

[13] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms*. MIT Press.

[14] Dali-Ali, F. K., & Kouaouci, A. (2023). Modalités de mise en oeuvre de la value stream mapping : la cartographie au service de la performance en entreprise. Mémoire de fin de cycle, École des Hautes Etudes Commerciales.

[15] Durand, A. (2004). *Maîtrise d'oeuvre des projets informatiques : De la gestion du périmètre au contrôle des risques et des coûts*. Dunod.

[16] Faure, R., Lemaire, B., & Picouleau, C. (2014). *Précis de recherche opérationnelle : Méthodes et exercices d'application (7ème édition)*. Dunod.

[17] Fournier, J. (2009). *Graphs Theory and Applications : With Exercises and Problems*. Wiley-ISTE.

[18] Ganesh, K., Mohapatra, S., Anbuudayasankar, S. P., & Sivakumar, P. (2014). *Enterprise resource planning : fundamentals of design and implementation*. Springer.

[19] Gourc, D., & Bougaret, S. (2000). L'industrie pharmaceutique : ses projets de développement, leurs caractéristiques et leur management. *La Cible – La Revue Francophone du Management de Projet*, 81, 4-8.

[20] Hadji, R., & Henni Douma, R. (2022). Optimisation des coûts de transport par les camions à bennes, cas de LAFARGE - Algérie. Projet de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.

[21] Haouas, I., & Kebaili, I. (2022). Choix des fournisseurs pour l'achat des matières premières-CAS BCR-ORFEE. Mémoire de Fin d'Études, École Nationale Supérieur de Technologie.

[22] Haouas, S., & Reboul, A. N. E. (2021). Elaboration d'un plan de transport équitable pour les chauffeurs de bus (CAS ETUS Boumerdès). Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.

[23] Houam, Y. (2013). Commande Multi-Objectifs en utilisant les inégalités matricielles linéaires (LMIS) et les algorithmes génétiques. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Automatique, Université Mohamed Khider – Biskra.

[24] Kerouat, N., & Moussa, A. (2021). Optimisation du placement des pièces dans un entrepôt Cas : GEFCO Boufarik. Mémoire pour l'obtention du diplôme de MASTER en GENIE LOGISTIQUE ET TRANSPORT, École Nationale Supérieur de Technologie.

[25] Klaus, H., Rosemann, M., & Gable, G. G. (2000). What is ERP ?. *Information systems frontiers*, 2, 141-162.

[26] Lacombe, C. (2015). Contribution à une méthodologie et une modélisation pour accompagner les petites entreprises dans l'étude de leur organisation afin de spécifier leurs besoins et sélectionner une solution ERP. Ph.D. thesis, Université de Bordeaux.

[27] Laudon, K., & Laudon, J. (2010). *Management des systèmes d'information*. Pearson Education France.

[28] LAYEB, A. (2010). Utilisation des approches d'Optimisation combinatoire pour la vérification des applications temps réel [Thèse présentée à la faculté des Sciences de l'Ingénieur en vue de l'obtention du grade de Docteur en science en Informatique]. Université Mentouri de Constantine.

[29] Lequeux, J. L. (2011). *Manager avec les ERP : architecture orientée services (SOA)*. Editions Eyrolles.

[30] Marliyatou, D. (2023). Implémentation d'un ERP au sein d'une entreprise de structure horizontale [Master Business Analyst]. Haute École ICHEC - ECAM - ISFSC.

[31] Moisdon, J.-C., & Nakhla, M. (2009). *Recherche opérationnelle : méthodes d'optimisation en gestion*. Les Presses des MINES.

[32] Morley, C. (2016). *MANAGEMENT D'UN PROJET SYSTÈME D'INFORMATION : Principes, techniques, mise en œuvre et outils (6ème édition)*. Dunod.

[33] Muller, S. (2011). L'industrie pharmaceutique et l'État : Comment garantir la santé sans nuire au commerce ?. *Savoir/Agir*, 16, 37-42. https ://-doi.org/10.3917/sava.016.0037

[34] Navarro, M. (2009). L'industrie pharmaceutique. *Regards croisés sur l'économie*, 5, 210-214. https ://doi.org/10.3917/rce.005.0210

[35] Organisation internationale de normalisation. (2012). ISO 21500 :2012 - Lignes directrices sur le management de projet. ISO.

[36] Oudani, M. (2016). Optimisation des problèmes de transport multimodal : Modélisation et simulation (Thèse de doctorat, Université du Havre ; Université Sidi Mohamed ben Abdellah, Maroc). Faculté de droit. NNT : 2016LEHA0005.

[37] Panorama Consulting Group. (2024). The 2024 ERP Report. Consulté le 22 mai 2024, à partir de https ://www.panorama-consulting.com/resource-center/erp-report/

[38] Paschos, V. T. (2014). *Concepts of combinatorial optimization*. John Wiley & Sons.

[39] Project Management Institute. (2017). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide) (6th ed.)*. Project Management Institute.

[40] Ptak, C. A., & Schragenheim, E. (2003). *ERP : tools, techniques, and applications for integrating the supply chain*. Crc Press.

[41] Ramaa, A., Subramanya, K. N., & Rangaswamy, T. M. (2012). Impact of warehouse management system in a supply chain. *International Journal of Computer Applications*, 54(1).

[42] Reix, R. (2004). *Systèmes d'information et management des organisations (5e éd.)*. Vuibert.

[43] Rennard, J.-P. (2000, avril). Genetic Algorithm Viewer : Démonstration d'un algorithme génétique. Introduction aux algorithmes génétiques : Evolution et optimisation, Evolution et algorithmes génétiques, Fonctionnement d'un algorithme génétique, Adaptation et sélection : le problème du rééchelonnement, Genetic Algorithm Viewer 1.0.

[44] Röthlin, M. (2010). *Management of data quality in enterprise resource planning systems*. BoD – Books on Demand.

[45] Schmitt, D. (2022). " Information"(définition). *Dictionnaire de muséologie, sous la direction de François Mairesse*, 318-321.

[46] Shanks, G., Seddon, P., & Willcocks, L. (Eds.). (2003). *Second-Wave Enterprise Resource Planning Systems* (pp. 102–132). Cambridge : Cambridge University Press.

[47] Somers, T. M., & Nelson, K. G. (2003). The impact of strategy and integration mechanisms on enterprise system value : Empirical evidence from manufacturing firms. *European Journal of Operational Research*, 146(2), 315-338.

[48] SOUMATIA, M., & YAKHOU, N. (2020). Etude d'ingénierie de sécurité incendie au sein de l'usine pharmaceutique El Kendi [Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI]. École Nationale Polytechnique, Alger.

[49] Sumner, M. (2013). *Enterprise resource planning*. Pearson rEducation.

[50] Vahrenkamp, R. (2018b, 19 février). Enterprise-Resource-Planning-System. *Gabler Wirtschaftslexikon*. Consulté le 22 juin 2024, à partir de https ://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/enterprise-resource-planning-system-51587/version-274748

[51] Varinard, C. (2018). *Système d'information de gestion DCG 8*.

[52] VENTECLEF, C. (2014). Implantation d'un ERP : entre exigences opérationnelles et défis stratégiques. [Mémoire de fin d'études]. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.

[53] http ://vroom-project.org/

[54] https ://aws.amazon.com/fr/whatis/java/# : :text=Java%20is%20a%20widely%2Dused,as%20a%2

[55] https ://developer.mozilla.org/fr/docs/Web/CSS

[56] https ://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfxoverview.htm#JFXST784

[57] https ://docs.oracle.com/javase/8/scene-builder-2/get-started-

[58] tutorial/overview.htm#JSBGS164

[59] Site de l'entreprise Kompass : https ://dz.kompass.com/c/el-kendi-industrie-du-medicament-spa/dz242300/

[60] https ://fxdocs.github.io/docs/html5/#_performance

[61] https ://github.com/VROOM-Project/vroom/wiki

[62] Site officiel de l'entreprise : https ://mspharma.com/fr/notre-affaire

[63] https ://wiki.openstreetmap.org/wiki/Using_OpenStreetMap

[64] https ://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-uml-3979/

[65] Site d'Oracle : https ://www.oracle.com/fr/

[66] https ://www.postgresql.org/about/

[67] Site de SAP : https ://www.sap.com/france/index.html

[68] Harwood, S. (2017). ERP : the Implementation Cycle. Routledge.

Annexe A

Figures et tableau

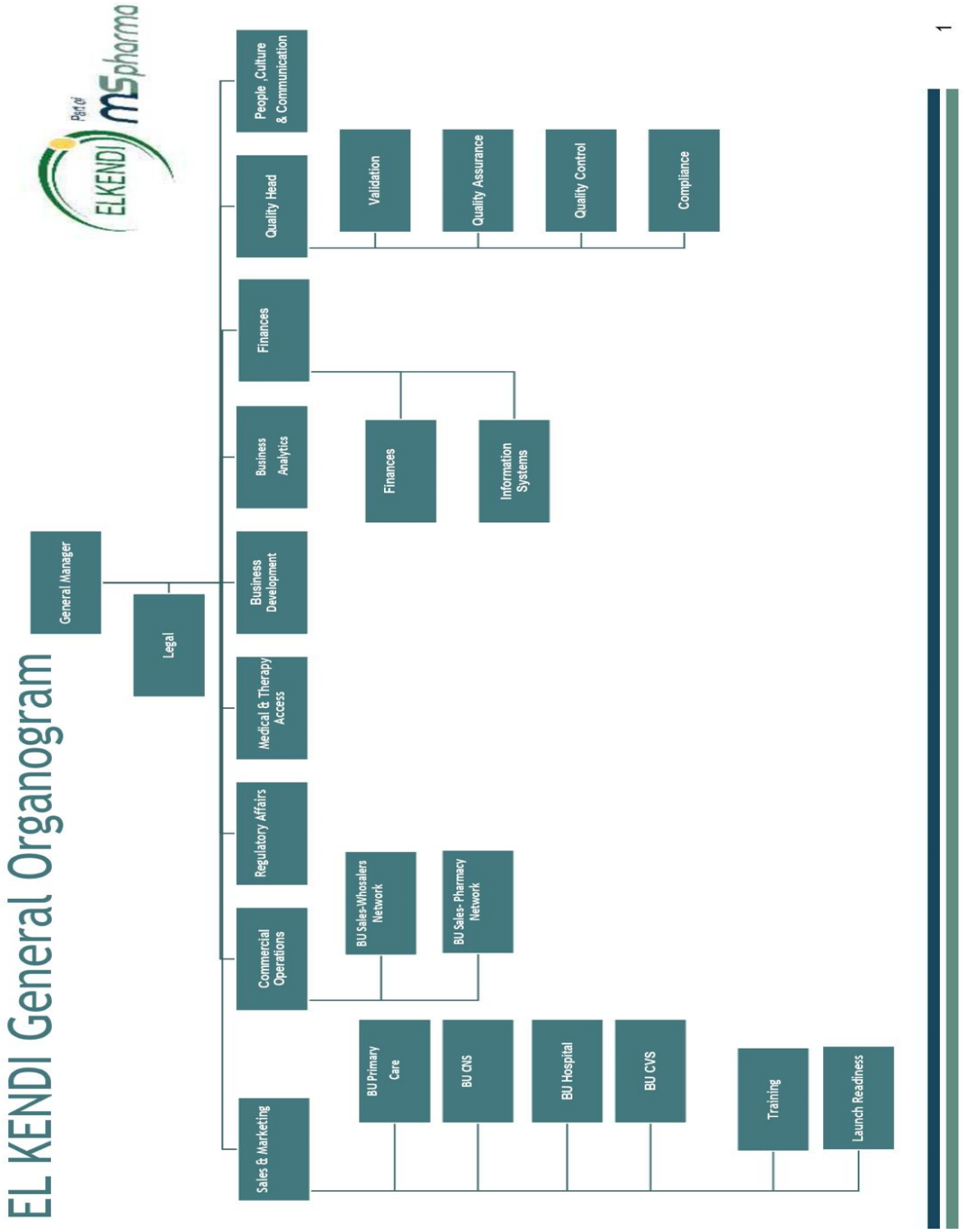


FIGURE A 1 – Organigramme de l'entreprise

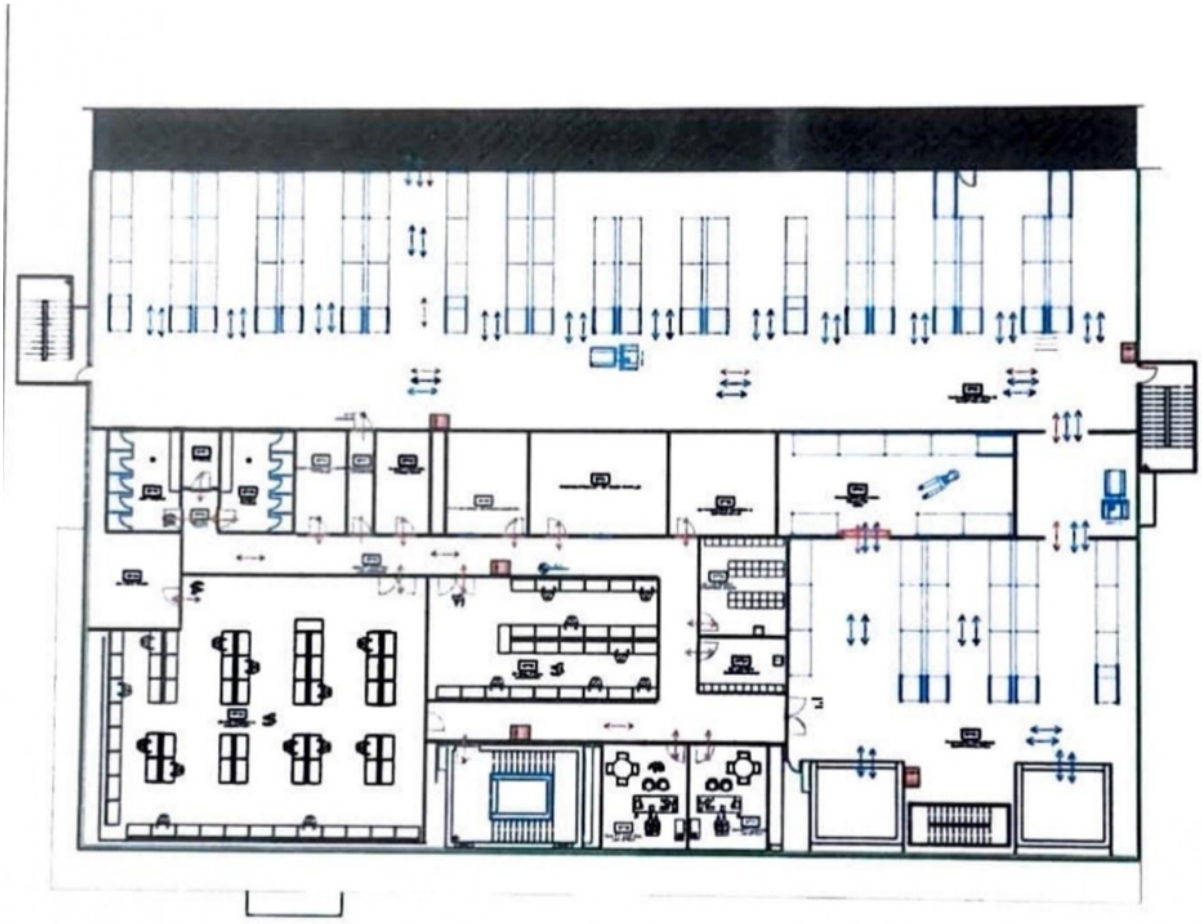


FIGURE A 2 – Plan AC 1

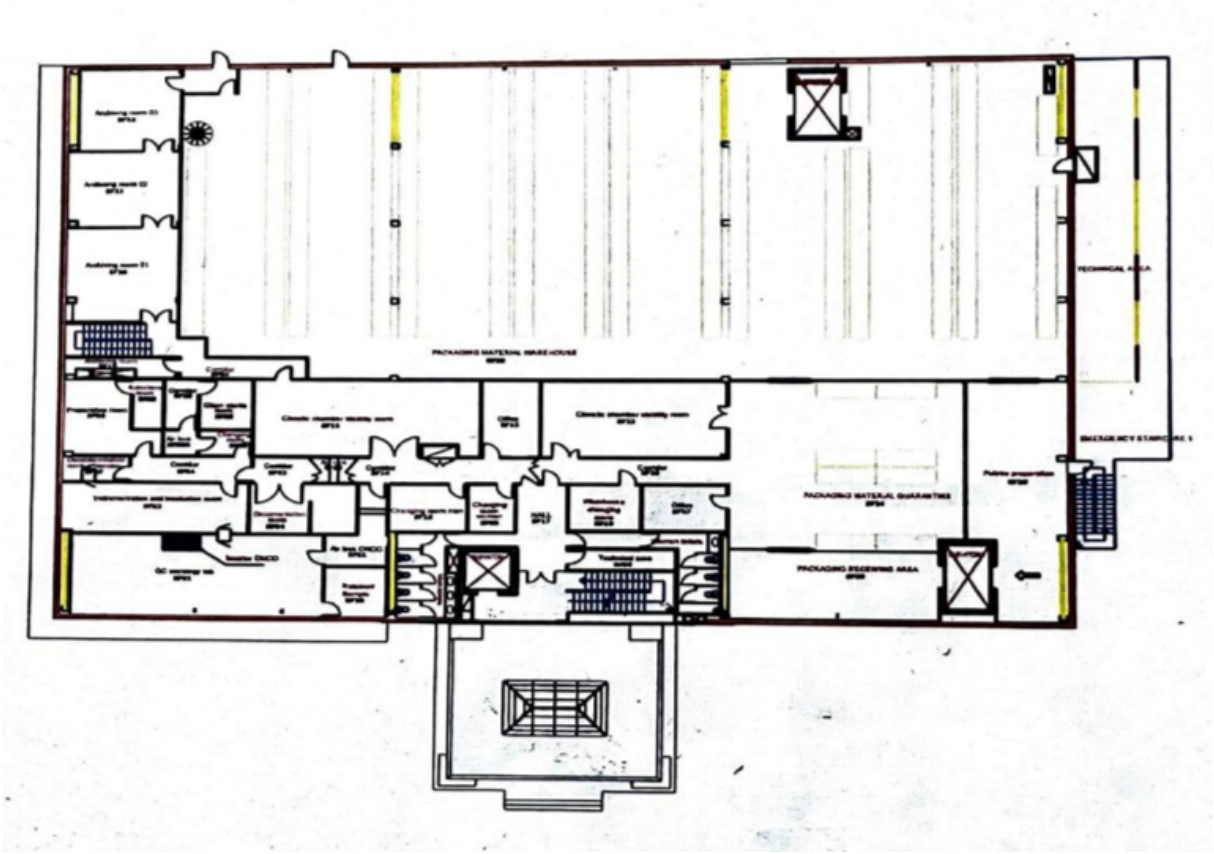


FIGURE A 3 – Plan AC 2

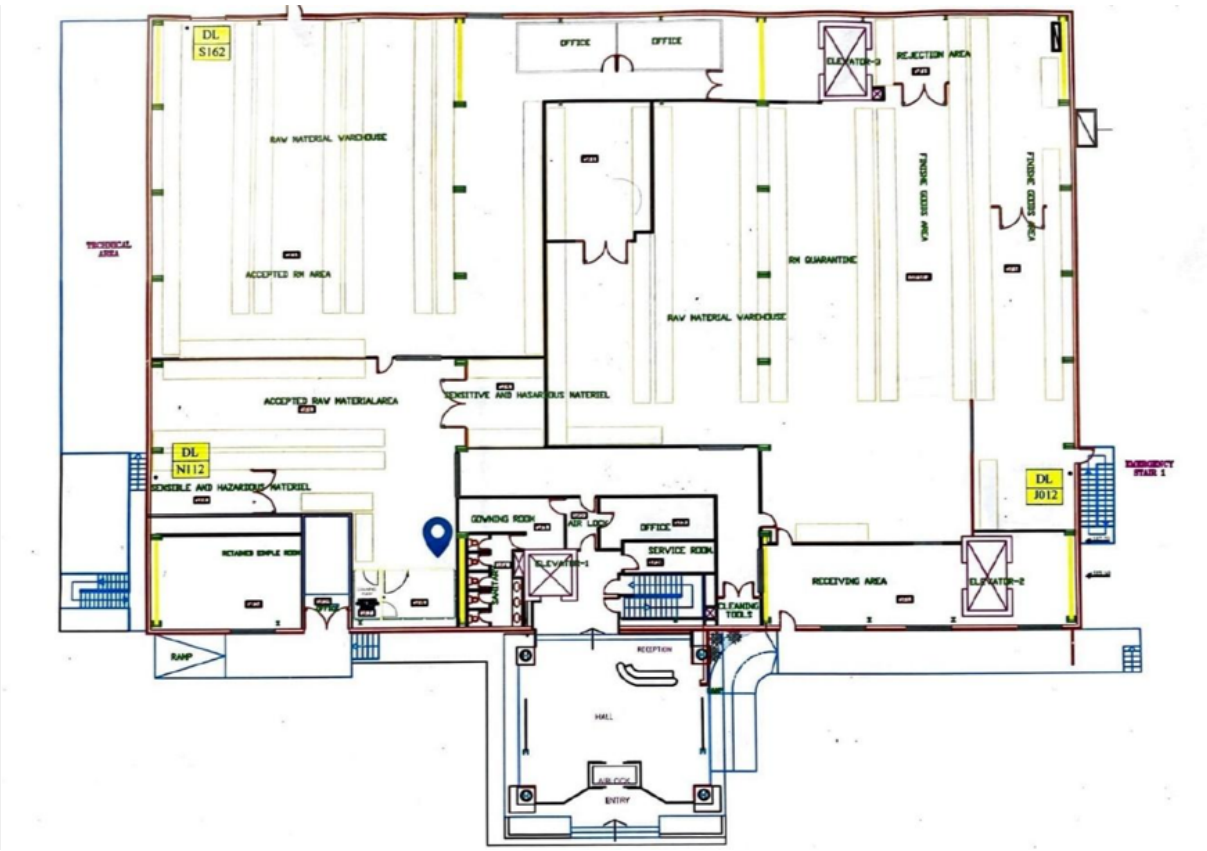


FIGURE A 4 – Plan Magasin 1

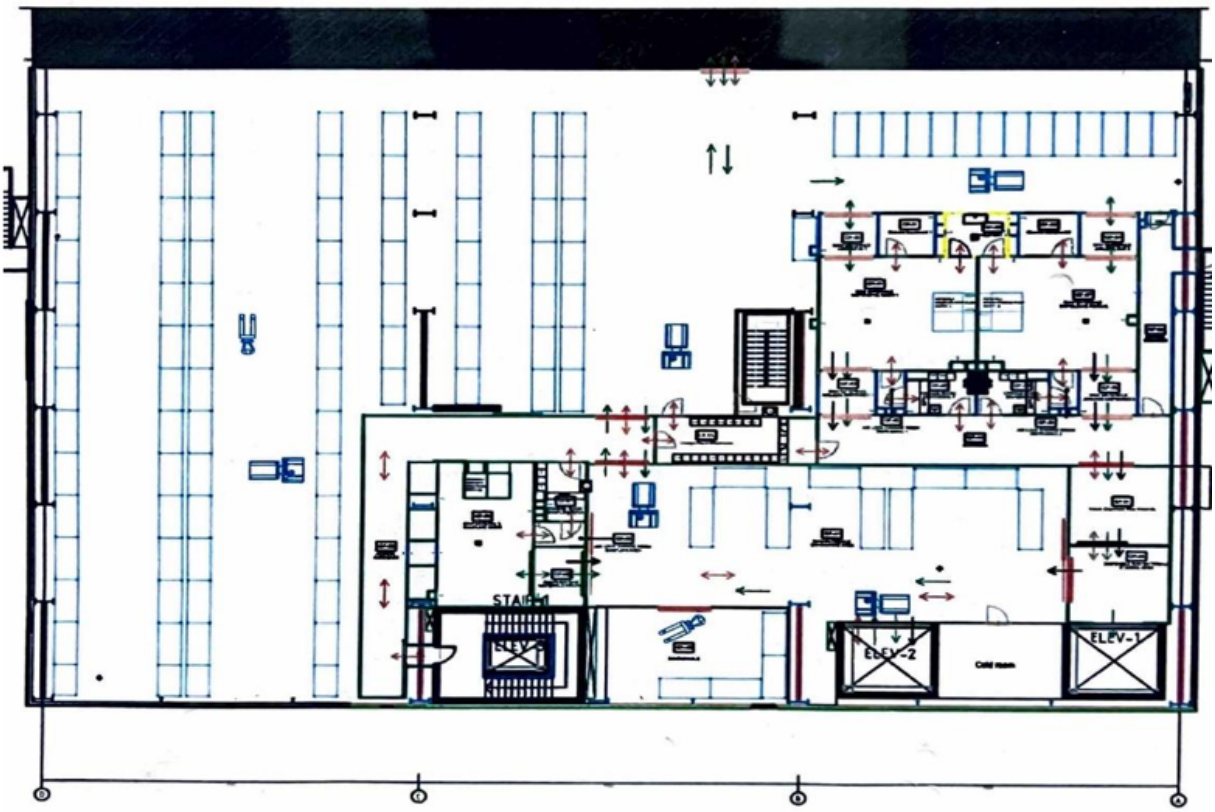


FIGURE A 5 – Plan Magasin 2

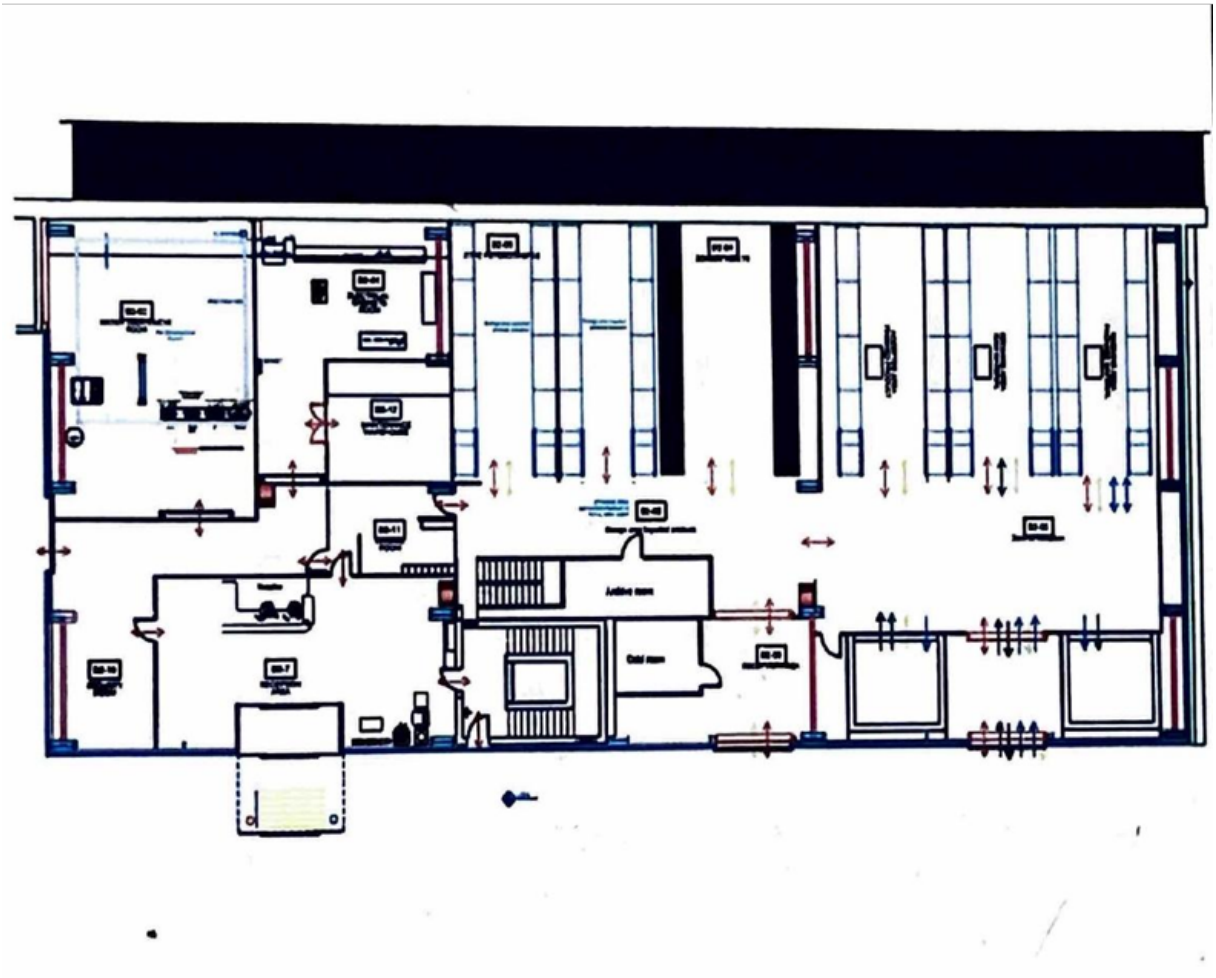


FIGURE A 6 – Plan magasin produit fini importé

ELKENDI	Procédure De Réception Des Matières Premières, Articles De Conditionnement Et Du Produits intermédiaires	Attachment Nr
	WH0002F/FF02/06 Avis de Réception	SOPWH0002_F.1 7-Ek.02

Partie I : Enregistrement des Données Par WH	
Date de réception :	.....
Heure de réception :	.....
Code article :	.....
Désignation :	.....
N° de réception	.....
Nature de réception :	☐ AC ☐ MP ☐ Autre : .....

1/ Contrôle des Documents accompagnants les matières et emballages.			
	Existe	N'existe pas	Non Applicable
Bon d'entrée ou livraison	☐	☐	☐
Liste de colisage	☐	☐	☐
Bulletin de conformité (COA)	☐	☐	☐
Bon de commande	☐	☐	☐
Décharge	☐	☐	☐

2/ Contrôle physique		
2.1/Moyen de transport	**Oui**	**Non**
Camion Couvert	☐	☐
Camion Propre	☐	☐
Camion frigorifique	☐	☐
2.2/Etat des Palettes et contenants	**Oui**	**Non**
Arrangement palettes	☐	☐
Mouillés	☐	☐
Endommagés)	☐	☐
Propre	☐	☐
Filmés	☐	☐
Scellés	☐	☐
Déformés	☐	☐
Non identifiés	☐	☐
Thermo hygromètre (pour les MP et IP sensible)	☐	☐
Palettes traitées	☐	☐
Palettes conforme (Dimension)	☐	☐

2.3/Type de contenant	☐ Fut	☐ Caisse Carton	☐ Sacs
	☐ Pallette	☐ Flacon	☐ Autre:.....
2.4/Condition de stockage	☐ T°C	☐ Hr%	☐ Autre:.....

Original Copy

FIGURE A 7 – fiche de reception 1

ELKENDI	Procédure De Réception Des Matières Premières, Articles De Conditionnement Et Du Produits intermédiaires	**Attachment Nr**
	WH0002F/FF02/06 Avis de Réception	SOPWH0002_F.17-Ek.02

3/Contrôle de la concordance des spécifications inscrites sur l'étiquette fournisseur par rapport aux documents		
	Cohérent	**Incohérent**
Désignation article	☐	☐
N° lot Fournisseur	☐	☐
Date de Fabrication (matières)	☐	☐
Date de Péremption ou Restest (matières)	☐	☐
Vérification sur la liste des Fournisseur Approuver	☐	☐
Quantité Total	.....	
Quantité /Contenant uncomplet	...../.....	
Nbre/ Quantité des contenants complets	...../.....	
Nbre/ Quantité des contenants incomplets	...../.....	

4/Contrôle les étiquettes des contenants		
	Existe	**N'existe pas**
Nom du fournisseur	☐	☐
Origine de la matière (Fabricant)	☐	☐
Désignation	☐	☐
Lot fournisseur	☐	☐
Date de fabrication	☐	☐
Date de péremption	☐	☐
Date de Retest/ péremption	☐	☐
Poids net	☐	☐
5/Action corrective en cas d'anomalie		
Prendre des photos	☐	
Emballer le contenant dans un sacs/caisse carton	☐	
Retour au fournisseur	☐	
Ouvrir une déviation	☐	
Autre :.....	☐	
Observations :		

	Nom /Prénom	**Signature**	**Date**
Fait Par :			
Vérifier Par :			
Reçu Par Data :			

Original Copy

FIGURE A 8 – fiche de reception 2

ELKENDI	Procédure De Réception Des Matières Premières, Articles De Conditionnement Et Du Produits intermédiaires	Attachment Nr
	WH0002F/FF02/06 Avis de Réception	SOPWH0002_F.17-Ek.02

Partie II : Enregistrement des Données Par Data			
N° de réception :	REC		
Code d'article :	**Désignation :**		**N° de Lot Interne :**
Nom du fournisseur :		**Numéro de Lot Fournisseur :**	
Nom du fabricant :		**Numéro de Lot Fabricant :**	
Type de contenant			
Nombre des contenants complet :		**Quantité par Contenant :**	
Nombre des contenants incomplets :		**Quantité par Contenant :**	
Nombre Totale des contenants		**Quantité Total :**	
Date FAB :		**Date EXP :**	
Date Re-Test :			
Observations :			

Partie de Vérification des Données par DATA			
Fait par DATA *Initial, date et signature*		**Vérifié par DATA** *Initial, date et signature*	

Partie Réservée au QC			
Date :	……/……./…….	**Préleveur :** *Initial, date et signature*	
Nombre Des Contenants Prélevés : *Pour le composite*			
Numéros Des Contenants Prélevés : *Pour le composite*			
Quantité Totale Prélevée : *Pour le composite*			
Nombre des Contenants Libérés :		**Nombre des Contenants Non Libérés**	
Date de Re-Test *(interne)* **:**			
Observation			

Partie Approbation du QC			
Reçu par QC : *Initial, date et signature*		**Approuvée Par QC :** *Initial, date et signature*	

Original Copy

FIGURE A 9 – fiche de reception 3

Les résultats de la simulation pour le choix de l'emplacement des produits réceptionnés :

ProductID	Quantity	Rack	Position	Niveau
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	53	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	8	60	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	26	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	19	4
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	6	15	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	32	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	18	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	16	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	37	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	8	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	10	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	44	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	18	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	20	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	4	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	34	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	6	36	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	3	9	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	8	28	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	22	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	25	4
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	43	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	33	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	11	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	20	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	38	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	18	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	8	27	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	64	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	15	4
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	2	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	32	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	9	11	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	6	56	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	8	24	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	30	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	19	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	9	23	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	45	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	17	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	58	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	35	1

FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	67	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	31	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	63	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	23	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	65	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	52	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	3	15	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	37	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	11	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	11	15	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	46	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	44	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	21	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	32	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	37	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	7	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	3	23	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	59	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	11	31	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	3	6	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	5	51	0
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	10	46	4
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	35	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	1	11	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	36	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	0	53	4
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	2	16	1
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	20	2
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	4	60	3
FLAZOL Oral Suspension	1799.0	7	32	2
FLAZOL Oral Suspension	72.0	8	29	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	10	4
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	48	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	6	10	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	8	13	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	1	52	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	9	65	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	6	31	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	10	52	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	10	57	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	11	27	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	8	2	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	8	27	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	9	66	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	8	57	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	10	44	2
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	10	23	0

TABIFLEX COOL Gel	3599.0	6	49	4
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	7	29	2
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	10	12	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	1	30	2
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	9	8	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	2	50	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	65	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	36	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	3	36	4
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	5	28	2
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	9	19	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	19	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	7	41	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	8	44	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	7	3	3
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	32	2
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	0	33	2
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	10	13	4
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	11	17	1
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	4	21	0
TABIFLEX COOL Gel	3599.0	3	13	4
TABIFLEX COOL Gel	37.0	6	54	2
MENTEX Syrup	1802.0	7	24	0
MENTEX Syrup	1802.0	1	57	1
MENTEX Syrup	1802.0	0	42	0
MENTEX Syrup	1802.0	1	65	3
MENTEX Syrup	1802.0	4	12	3
MENTEX Syrup	1802.0	2	35	1
MENTEX Syrup	1802.0	1	22	0
MENTEX Syrup	1802.0	5	34	2
MENTEX Syrup	1802.0	10	63	0
MENTEX Syrup	1802.0	10	10	0
MENTEX Syrup	1802.0	8	63	0
MENTEX Syrup	1802.0	0	10	0
MENTEX Syrup	1802.0	7	42	0
MENTEX Syrup	1802.0	0	2	2
MENTEX Syrup	1802.0	4	24	0
MENTEX Syrup	1802.0	6	1	1
MENTEX Syrup	1802.0	6	18	3
MENTEX Syrup	1802.0	1	10	0
MENTEX Syrup	1802.0	8	55	2
MENTEX Syrup	1802.0	1	36	0
MENTEX Syrup	1802.0	11	15	1
MENTEX Syrup	1802.0	6	22	0
MENTEX Syrup	1802.0	0	47	2
MENTEX Syrup	1802.0	8	19	1
MENTEX Syrup	1802.0	8	25	2

MENTEX Syrup	1802.0	6	7	0
MENTEX Syrup	1802.0	5	42	3
MENTEX Syrup	1802.0	5	41	3
MENTEX Syrup	1802.0	8	33	1
MENTEX Syrup	1802.0	7	37	3
MENTEX Syrup	1802.0	2	24	0
MENTEX Syrup	1802.0	7	21	0
MENTEX Syrup	1802.0	7	9	0
MENTEX Syrup	1802.0	7	44	3
MENTEX Syrup	1802.0	8	19	0
MENTEX Syrup	1802.0	5	12	2
MENTEX Syrup	1802.0	2	28	1
MENTEX Syrup	1802.0	0	20	2
MENTEX Syrup	1802.0	1	6	3
MENTEX Syrup	1802.0	5	0	0
MENTEX Syrup	1802.0	10	29	0
MENTEX Syrup	1802.0	4	45	0
MENTEX Syrup	1802.0	2	15	0
MENTEX Syrup	1802.0	3	59	1
MENTEX Syrup	1802.0	10	23	1
MENTEX Syrup	1802.0	6	28	1
MENTEX Syrup	1802.0	9	59	3
MENTEX Syrup	1802.0	10	21	3
MENTEX Syrup	1802.0	7	47	2
MENTEX Syrup	1802.0	3	66	0
MENTEX Syrup	1802.0	10	23	3
MENTEX Syrup	1802.0	1	15	0
MENTEX Syrup	1802.0	8	9	1
MENTEX Syrup	1802.0	3	67	0
MENTEX Syrup	1802.0	5	46	0
MENTEX Syrup	1802.0	9	24	2
MENTEX Syrup	1802.0	5	34	0
MENTEX Syrup	1802.0	7	10	4
MENTEX Syrup	1684.0	4	2	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	4	66	4
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	10	19	1
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	0	15	2
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	8	21	3
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	3	18	3
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	2	65	1
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	4	16	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	10	53	2
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	5	6	1
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	0	8	1
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	8	0	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	2	29	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	3	50	2

CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	1	44	1
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	2	64	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	7	67	2
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	3	51	4
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	8	12	3
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	3	47	3
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	5	48	2
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	5	64	3
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	3	5	1
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	3	5	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	7	48	0
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	7	9	3
CO-SARTEG 160/12.5 F/C	3840.0	9	63	2
PROF Oral Suspension	1802.0	10	15	0
PROF Oral Suspension	1802.0	1	33	0
PROF Oral Suspension	1802.0	7	52	3
PROF Oral Suspension	1802.0	5	23	1
PROF Oral Suspension	1802.0	8	37	0
PROF Oral Suspension	1802.0	5	11	4
PROF Oral Suspension	1802.0	0	22	0
PROF Oral Suspension	1802.0	1	49	2
PROF Oral Suspension	1802.0	9	12	0
PROF Oral Suspension	1802.0	7	10	2
PROF Oral Suspension	1802.0	8	32	3
PROF Oral Suspension	1802.0	2	28	3
PROF Oral Suspension	1802.0	3	9	4
PROF Oral Suspension	1802.0	8	52	2
PROF Oral Suspension	1802.0	8	35	0
PROF Oral Suspension	1802.0	8	51	2
PROF Oral Suspension	1802.0	7	32	3
PROF Oral Suspension	1802.0	7	43	1
PROF Oral Suspension	1802.0	4	42	4
PROF Oral Suspension	1802.0	8	6	1
PROF Oral Suspension	1802.0	6	8	2
PROF Oral Suspension	1802.0	4	42	2
PROF Oral Suspension	1802.0	2	21	2
PROF Oral Suspension	1802.0	2	28	0
PROF Oral Suspension	1802.0	2	43	4
PROF Oral Suspension	1802.0	7	32	4
PROF Oral Suspension	1802.0	7	20	0
PROF Oral Suspension	1802.0	4	54	0
PROF Oral Suspension	1802.0	5	39	1
PROF Oral Suspension	1802.0	0	27	1
PROF Oral Suspension	1802.0	2	15	1
PROF Oral Suspension	1802.0	3	39	1
PROF Oral Suspension	1802.0	10	51	3
PROF Oral Suspension	1802.0	3	40	4

PROF Oral Suspension	1802.0	10	50	2
PROF Oral Suspension	1802.0	8	32	4
PROF Oral Suspension	1802.0	8	17	0
PROF Oral Suspension	1802.0	3	1	2
PROF Oral Suspension	1802.0	8	23	1
PROF Oral Suspension	1802.0	6	9	2
PROF Oral Suspension	1802.0	5	38	0
PROF Oral Suspension	1802.0	8	35	1
PROF Oral Suspension	1802.0	8	29	0
PROF Oral Suspension	1802.0	6	36	0
PROF Oral Suspension	1802.0	2	35	0
PROF Oral Suspension	1802.0	3	58	2
PROF Oral Suspension	1802.0	1	45	0
PROF Oral Suspension	1802.0	0	40	3
PROF Oral Suspension	1802.0	7	26	3
PROF Oral Suspension	1802.0	8	18	4
PROF Oral Suspension	1802.0	11	68	1
PROF Oral Suspension	1802.0	10	63	3
PROF Oral Suspension	1802.0	7	36	1
PROF Oral Suspension	1802.0	8	31	2
PROF Oral Suspension	1802.0	2	28	2
PROF Oral Suspension	1802.0	2	31	0
PROF Oral Suspension	1802.0	0	44	2
PROF Oral Suspension	1802.0	6	43	2
PROF Oral Suspension	1802.0	3	22	2
PROF Oral Suspension	1802.0	4	58	0
PROF Oral Suspension	1680.0	6	53	1
LANZAPPREX	2880.0	4	4	1
LANZAPPREX	2880.0	5	63	2
LANZAPPREX	2880.0	4	15	3
LANZAPPREX	2880.0	0	3	0
LANZAPPREX	2880.0	2	33	2
LANZAPPREX	2880.0	0	56	2
LANZAPPREX	2880.0	0	4	0
LANZAPPREX	2880.0	0	50	4
LANZAPPREX	2880.0	8	46	4
LANZAPPREX	2880.0	9	53	3
LANZAPPREX	2880.0	2	6	4
LANZAPPREX	2880.0	10	4	2
LANZAPPREX	2880.0	3	49	4
LANZAPPREX	2880.0	8	47	0
LANZAPPREX	2880.0	5	52	0
LANZAPPREX	2880.0	7	28	0
LANZAPPREX	2880.0	6	54	1
LANZAPPREX	2880.0	2	1	2
LANZAPPREX	2880.0	6	31	3
LANZAPPREX	2880.0	6	8	1

LANZAPPREX	2880.0	6	60	3
LANZAPPREX	2880.0	7	21	2
LANZAPPREX	2880.0	3	15	0
LANZAPPREX	2880.0	2	46	2
LANZAPPREX	2880.0	7	58	3
LANZAPPREX	2880.0	1	14	1
LANZAPPREX	2880.0	1	29	3
LANZAPPREX	2880.0	4	15	0
LANZAPPREX	2880.0	8	49	4
LANZAPPREX	2880.0	11	67	1
LANZAPPREX	2880.0	9	7	4
LANZAPPREX	2880.0	8	35	2
LANZAPPREX	2880.0	0	34	0
LANZAPPREX	2880.0	5	28	1
LANZAPPREX	2880.0	6	47	1
LANZAPPREX	2880.0	1	59	0
LANZAPPREX	2880.0	10	13	3
LANZAPPREX	2880.0	10	9	3
LANZAPPREX	2880.0	6	24	0
LANZAPPREX	2880.0	7	37	2
LANZAPPREX	2880.0	8	15	3
LANZAPPREX	2880.0	0	32	3
LANZAPPREX	2880.0	0	24	3
LANZAPPREX	2880.0	2	22	2
LANZAPPREX	2880.0	5	5	0
CALEVIT Syrup	1802.0	1	31	3
CALEVIT Syrup	1802.0	1	34	3
CALEVIT Syrup	1802.0	11	35	0
CALEVIT Syrup	1802.0	5	8	1
CALEVIT Syrup	1802.0	9	0	1
CALEVIT Syrup	1802.0	10	5	0
CALEVIT Syrup	1802.0	5	50	2
CALEVIT Syrup	1802.0	2	9	3
CALEVIT Syrup	1802.0	5	33	1
CALEVIT Syrup	1802.0	1	24	3
CALEVIT Syrup	1802.0	5	33	0
CALEVIT Syrup	1802.0	1	40	2
CALEVIT Syrup	1802.0	9	43	1
CALEVIT Syrup	1802.0	5	43	4
CALEVIT Syrup	1802.0	11	25	1
CALEVIT Syrup	1802.0	6	47	0
CALEVIT Syrup	1802.0	1	11	4
CALEVIT Syrup	1802.0	0	17	0
CALEVIT Syrup	1802.0	1	21	0
CALEVIT Syrup	1802.0	2	17	3
CALEVIT Syrup	1802.0	10	60	1
CALEVIT Syrup	1802.0	3	16	2

CALEVIT Syrup	1802.0	3	41	0
CALEVIT Syrup	1802.0	8	55	0
CALEVIT Syrup	1802.0	9	18	2
CALEVIT Syrup	1802.0	4	31	3
CALEVIT Syrup	1802.0	4	37	2
CALEVIT Syrup	1802.0	4	23	1
CALEVIT Syrup	1802.0	2	8	0
CALEVIT Syrup	1802.0	4	33	2
CALEVIT Syrup	1802.0	6	64	0
CALEVIT Syrup	1802.0	5	31	2
CALEVIT Syrup	1802.0	1	27	3
CALEVIT Syrup	1802.0	10	34	0
CALEVIT Syrup	1802.0	1	0	1
CALEVIT Syrup	1802.0	9	30	2
CALEVIT Syrup	1802.0	7	63	1
CALEVIT Syrup	1802.0	2	54	1
CALEVIT Syrup	1802.0	7	40	3
CALEVIT Syrup	1802.0	0	52	0
CALEVIT Syrup	1802.0	3	64	1
CALEVIT Syrup	1802.0	9	14	2
CALEVIT Syrup	1802.0	2	6	3
CALEVIT Syrup	1802.0	7	62	0
CALEVIT Syrup	1802.0	1	4	0
CALEVIT Syrup	1802.0	0	4	1
CALEVIT Syrup	1802.0	4	60	0
CALEVIT Syrup	1802.0	6	42	2
CALEVIT Syrup	1802.0	0	14	3
CALEVIT Syrup	1802.0	2	33	0
CALEVIT Syrup	1700.0	7	29	1
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	10	36	2
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	10	51	1
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	1	1	2
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	10	44	1
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	0	28	0
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	3	45	3
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	11	7	3
FLAZOL 500 Coat Tablets	10000.0	2	39	2
RAPIDUS	960.0	3	51	3
RAPIDUS	960.0	10	48	2
RAPIDUS	960.0	2	53	1
RAPIDUS	960.0	7	14	0
RAPIDUS	960.0	7	29	0
RAPIDUS	960.0	3	50	3
RAPIDUS	960.0	3	39	0
RAPIDUS	960.0	2	4	1
RAPIDUS	960.0	5	52	3
RAPIDUS	960.0	0	5	2

RAPIDUS	960.0	8	37	3
RAPIDUS	960.0	8	25	3
RAPIDUS	960.0	7	48	2
RAPIDUS	960.0	0	11	0
RAPIDUS	960.0	10	45	2
RAPIDUS	960.0	3	50	1
RAPIDUS	960.0	3	67	1
RAPIDUS	960.0	4	0	3
RAPIDUS	960.0	1	54	3
RAPIDUS	960.0	8	9	3
RAPIDUS	960.0	9	0	0
RAPIDUS	960.0	1	60	1
RAPIDUS	960.0	6	11	0
RAPIDUS	960.0	0	27	0
RAPIDUS	960.0	0	45	0
RAPIDUS	960.0	8	26	3
RAPIDUS	960.0	6	10	2
RAPIDUS	960.0	10	17	0
RAPIDUS	960.0	1	16	0
RAPIDUS	160.0	8	1	2
TABETA pommade	9600.0	6	48	3
TABETA pommade	9600.0	8	44	2
TABETA pommade	9600.0	7	48	4
TABETA pommade	9600.0	5	42	1
TABETA pommade	9600.0	10	59	3
TABETA pommade	9600.0	10	66	1
TABETA pommade	9600.0	0	33	0
TABETA pommade	9600.0	2	32	0
ZETA Cream	9600.0	1	14	0
ZETA POMMADE	9600.0	9	51	0
EZILAX Syrup	960.0	8	53	2
EZILAX Syrup	960.0	0	43	3
EZILAX Syrup	960.0	1	42	1
EZILAX Syrup	960.0	6	21	0
EZILAX Syrup	960.0	8	38	0
EZILAX Syrup	960.0	3	31	1
EZILAX Syrup	960.0	6	2	3
EZILAX Syrup	960.0	7	35	3
EZILAX Syrup	960.0	4	18	1
EZILAX Syrup	960.0	6	9	0
EZILAX Syrup	960.0	7	50	1
EZILAX Syrup	960.0	7	36	3
EZILAX Syrup	960.0	2	67	3
EZILAX Syrup	960.0	7	47	3
EZILAX Syrup	960.0	9	50	2
EZILAX Syrup	960.0	3	24	0
EZILAX Syrup	960.0	9	4	0

EZILAX Syrup	960.0	4	66	0
EZILAX Syrup	960.0	0	68	0
EZILAX Syrup	960.0	7	57	0
EZILAX Syrup	960.0	1	9	0
EZILAX Syrup	960.0	0	32	0
EZILAX Syrup	960.0	6	50	0
EZILAX Syrup	960.0	4	38	3
EZILAX Syrup	960.0	10	17	3
EZILAX Syrup	960.0	11	51	2
EZILAX Syrup	960.0	5	20	0
EZILAX Syrup	960.0	4	33	0
EZILAX Syrup	960.0	10	6	2
EZILAX Syrup	960.0	2	38	2
EZILAX Syrup	960.0	2	34	1
EZILAX Syrup	960.0	1	44	4
EZILAX Syrup	960.0	6	0	3
EZILAX Syrup	960.0	1	30	0
EZILAX Syrup	960.0	1	42	0
EZILAX Syrup	960.0	2	37	3
EZILAX Syrup	960.0	3	42	0
EZILAX Syrup	960.0	0	61	0
EZILAX Syrup	960.0	2	38	3
EZILAX Syrup	960.0	6	6	4
EZILAX Syrup	960.0	3	30	0
EZILAX Syrup	960.0	2	45	2
EZILAX Syrup	960.0	4	57	0
EZILAX Syrup	960.0	4	9	1
EZILAX Syrup	960.0	5	46	2
EZILAX Syrup	960.0	9	17	3
EZILAX Syrup	960.0	1	49	3
EZILAX Syrup	960.0	9	67	2
EZILAX Syrup	960.0	0	25	3
EZILAX Syrup	960.0	9	11	0
EZILAX Syrup	960.0	5	15	3
EZILAX Syrup	960.0	0	55	3
EZILAX Syrup	960.0	2	19	1
EZILAX Syrup	960.0	1	28	1
EZILAX Syrup	960.0	11	5	0
EZILAX Syrup	960.0	5	50	3
EZILAX Syrup	960.0	1	16	1
EZILAX Syrup	960.0	4	24	2
EZILAX Syrup	960.0	8	28	2
EZILAX Syrup	960.0	7	49	2
EZILAX Syrup	960.0	1	51	2
EZILAX Syrup	960.0	10	13	2
EZILAX Syrup	960.0	6	43	1
EZILAX Syrup	960.0	11	3	1

EZILAX Syrup	960.0	7	18	0
EZILAX Syrup	960.0	0	25	0
EZILAX Syrup	960.0	8	12	2
EZILAX Syrup	960.0	8	62	1
EZILAX Syrup	960.0	7	35	0
EZILAX Syrup	960.0	4	15	2
EZILAX Syrup	960.0	10	56	4
EZILAX Syrup	960.0	9	41	3
EZILAX Syrup	960.0	6	12	2
EZILAX Syrup	960.0	4	57	3
EZILAX Syrup	960.0	1	12	0
EZILAX Syrup	960.0	1	7	1
EZILAX Syrup	960.0	5	26	3
EZILAX Syrup	960.0	10	1	0
EZILAX Syrup	960.0	8	40	3
EZILAX Syrup	960.0	1	56	0
EZILAX Syrup	960.0	6	42	0
EZILAX Syrup	960.0	10	24	0
EZILAX Syrup	960.0	4	14	0
EZILAX Syrup	960.0	6	37	0
EZILAX Syrup	960.0	6	40	0
EZILAX Syrup	960.0	3	63	3
EZILAX Syrup	960.0	7	60	0
EZILAX Syrup	960.0	3	31	0
EZILAX Syrup	960.0	2	23	2
EZILAX Syrup	960.0	6	61	4
EZILAX Syrup	960.0	9	33	1
EZILAX Syrup	960.0	6	15	2
EZILAX Syrup	960.0	5	7	3
ZETACORT Cream	9600.0	6	37	2
ZETACORT Cream	9600.0	0	36	3
ZETACORT Cream	9600.0	4	0	1
ZETACORT Cream	9600.0	4	45	4
ZETACORT Cream	9600.0	5	34	3
ZETACORT Cream	9600.0	4	53	0
ZETACORT Cream	9600.0	2	30	2
ZETACORT Cream	9600.0	6	47	3
ZETACORT Cream	9600.0	2	2	4
ZETACORT Cream	9600.0	3	19	0
ZETACORT Cream	9600.0	1	33	2

Résumé :

La conception du système ERP est ensuite abordée, en mettant l'accent sur les choix techniques et les modules nécessaires pour répondre aux besoins identifiés. Une approche méthodologique rigoureuse est adoptée pour développer un ERP adapté aux opérations logistiques de l'entreprise. L'implémentation pratique du système est décrite, incluant les tests effectués pour valider son efficacité et les ajustements réalisés pour améliorer ses performances.

Ce mémoire se concentre sur la résolution de divers problèmes complexes dans les domaines de la logistique et de la gestion de la production. Les principales problématiques abordées sont le problème de tournée de véhicules (VRP), le problème d'affectation pour la gestion de la production, l'affectation des produits finis vers des emplacements dans leurs zones de stockage, et le problème d'aide à la décision multicritère pour le choix des fournisseurs.

Abstract :

The design of the ERP system is then addressed, focusing on technical choices and necessary modules to meet identified needs. A rigorous methodological approach is adopted to develop an ERP tailored to the company's logistics operations. The practical implementation of the system is described, including tests conducted to validate its effectiveness and adjustments made to enhance its performance.

This thesis concentrates on solving various complex problems in logistics and production management. Key issues addressed include the Vehicle Routing Problem (VRP), assignment problems in production management, allocation of finished products to storage locations within their zones, and multi-criteria decision support for supplier selection.

ملخص :

تناول هذا العمل تصميم نظام تخطيط موارد المؤسسة، مع التركيز على الخيارات والنماذج التقنية اللازمة لتلبية الاحتياجات المحددة. ويعتمد نهج منهجي صارم لوضع نظام لتخطيط الموارد المؤسسية يتكيف مع العمليات اللوجستية للشركة. ويرد وصف للتنفيذ العملي للنظام، بما في ذلك اختبارات التحقق من فعاليته والتعديلات التي أجريت لتحسين أدائه.

وتركز هذه الأطروحة على حل مختلف المشاكل المعقدة في مجالي السوقيات وإدارة الإنتاج. والمسائل الرئيسية التي تم تناولها هي مشكلة توجيه المركبات، ومشكلة إسناد المهام لإدارة الإنتاج، وإسناد المنتجات النهائية إلى مواقع في مناطق تخزينها، ومشكلة دعم اتخاذ قرارات متعددة المعايير لاختيار الموردين.